

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Institut Dopravy**

**Matematické modelování pístových spalovacích motorů**  
**Mathematical modeling of internal combustion engines**

Student:

Martin Paleta

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal Richtář

Místo a rok:

Ostrava 2013

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Paleta**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie  
Téma: **Matematické modelování pístových spalovacích motorů**  
**Mathematical Modeling of Internal Combustion Engines**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Zhodnocení současného stavu
3. Teoretický náhled na modelování spalovacích motorů
4. Popis a tvorba výpočtového modelu PSM
5. Zhodnocení a doporučení
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Matějka, R. Vozidla silniční dopravy I. Bratislava: ALFA Bratislava. 1990. ISBN 80-05-00392-7  
Matějka, R. Vozidla silniční dopravy II. Bratislava: ALFA Bratislava. 1990. ISBN 80-7100-074-4  
Vlk, F.: Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. Brno: Vlk. 2001  
Vlk, F. Motorová vozidla I, Brno: VUT Brno. 1989. ISBN 80-214-0038-2

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Richtář**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

**Poděkování:**

Chtěl bych hlavně poděkovat Ing. Pavlu Dreslerovi za konzultace a velmi pozitivní přístup při řešení problémů u této bakalářské práce. Díky patří také mé sestře za pomoc s překladem anglických textů.

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením konzultanta a vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2013



.....  
Podpis studenta

### **Prohlašuji, že**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было сѣднано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было сѣднано, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2013



Podpis studenta

# **Anotace bakalářské práce**

Název práce:                   Matematické modelování pístových spalovacích motorů  
Autor:                             Martin Paleta  
Katedra:                         342 – Institut dopravy  
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Richtář, Institut dopravy Strojní fakulty  
VŠB – Technické univerzity v Ostravě

Bakalářská práce se zabývá matematickým modelováním pístových spalovacích motorů. V první části práce je popsána historie a teoretický základ principu funkce spalovacích motorů. Dále je rozebrána teorie modelování spalovacích motorů a simulační programy, podrobněji pak Lotus Engine Simulation. Hlavní částí je postup tvorby modelu v tomto programu.

## **Klíčová slova:**

Lotus Engine Simulation, spalovací motor, model motoru, simulace motoru, matematické modelování

## **Annotation of thesis**

Title: Mathematical modeling of internal combustion engines  
Author: Martin Paleta  
Department: 342 - Institute of transport  
Supervisor: Ing. Michal Richtář, Institute of transport, Faculty of  
Mechanical Engineering VŠB – Technical University of  
Ostrava

This thesis deals with the mathematical modeling of internal combustion engines. The First part describes the history and theoretical basis of the principle functions of internal combustion engines. It is also discussed theory modeling of internal combustion engines and simulation programs, in more detail Lotus Engine Simulation. The main part of the procedure is the model making in this program.

### **Keywords:**

Lotus Engine Simulation, the internal combustion engine, engine model, engine simulation, mathematical modeling

# Obsah

1	ÚVOD .....	9
2	Zhodnocení současného stavu .....	10
2.1	Teorie spalovacích motorů .....	10
2.1.1	Rozdělení pístových spalovacích motorů .....	11
2.1.2	Princip funkce pístového spalovacího motoru .....	15
2.1.3	Ventilový rozvod .....	19
2.2	Software používaný při vývoji pístových spalovacích motorů .....	22
2.2.1	Lotus Engine Simulation .....	22
2.2.2	Ricardo Wave .....	25
2.2.3	GT-Power .....	25
3	Teoretický náhled na modelování spalovacích motorů .....	27
3.1	Fyzikální principy .....	27
3.1.1	Termodynamický model hoření .....	27
3.1.2	Výměna náplně válce .....	28
3.1.3	Termodynamický model přestupu tepla .....	29
3.1.4	Výpočet proudění plynu potrubím .....	31
3.2	Metodika tvorby modelu .....	33
4	Popis a tvorba výpočtového modelu PSM .....	35
4.1	Popis jednotlivých prvků a jejich nastavení .....	35
4.2	Tvorba výpočtového modelu .....	42
5	Zhodnocení a doporučení .....	53
5.1	Vyhodnocení výsledků .....	53
5.1.1	Textové znázornění .....	54
5.1.2	Grafické znázornění .....	55
5.2	Doporučení .....	56
6	Závěr .....	57

## **Seznam použitých výrazů a zkratk**

LPG (Liquefied Petroleum Gas) – Zkapalněný ropný plyn, druh paliva

CNG (Compressed Natural Gas) – Stlačený zemní plyn, druh paliva

OHV (Over Head Valve) – Ventilový rozvod s vačkovým hřídelem v bloku motoru

OHC (Over Head Camshaft) – Ventilový rozvod s vačkovým hřídelem v hlavě válců

DOHC (Double OHC) - Ventilový rozvod s dvěma vačkovými hřídeli v hlavě válců

SV (Side Valve) – Ventilový rozvod s ventilem na boku válce

HÚ (Horní úvrat') – Horní úvrat' pístu spalovacího motoru

DÚ (Dolní úvrat') – Dolní úvrat' pístu spalovacího motoru



# 1 ÚVOD

V této bakalářské práci se věnuji modelování spalovacího motoru. Matematické modelování pomocí počítačových programů je dnes nedílnou součástí vývoje spalovacích motorů. Tyto programy nahradily analytické výpočty hlavně kvůli neporovnatelně nižší finanční a časové náročnosti, je možné také díky nim optimalizovat určité parametry motoru. Využívá se jich také z důvodů poměrně přesných výsledků simulací.

Historie spalovacích motorů tak, jak je známe dnes, sahá až do 2. poloviny 19. století, avšak první myšlenku využít tepelnou energii měl již v roce 1678 Francouz Hautefeuille, pokoušel se o to i Papin, návrhy však zůstaly nerealizovány. Roku 1794 navrhnul Angličan Street první pístový spalovací motor, ale ani tato myšlenka nebyla prakticky zrealizována. A tak první skutečně používaný dvoutaktní ležatý motor sestrojil až roku 1860 Francouz Jean Joseph Etienne Lenoir. Byl to motor s šoupátkovým rozvodem.

Nicolaus August Otto přišel na princip čtyřtakového motoru a společně s Eugenem Langenem rozvíjeli tento koncept. Roku 1867 na Světové výstavě v Paříži předvedli svůj atmosférický plynový motor. O 10 let později si jej nechal Otto patentovat. Objevení velkých zdrojů ropy značně urychlilo vývoj, a tím, kdo podnítil rozvoj motorů a celého automobilismu, byl Němec Gottlieb Daimler, ten v roce 1884 sestrojil rychloběžný benzínový čtyřtakový motor.

Tyto motory jsou předchůdci dnešních zážehových, u nichž se směs spaluje teoreticky za stálého objemu. Další možností je spalování rovnotlaké, již v roce 1860 tuto myšlenku vyslovil v Německu Siemens, první takovýto motor však sestrojil Američan Brayton, ale neuplatnil se kvůli své složitosti. Až v letech 1893-1897 vypracovala strojírna v Augsburgu koncept motoru, původně navržený Rudolfem Dieselem, který spaloval těžší kapalná paliva, mělo to být přiblížení se ke Carnotovu cyklu. Dnešní motory však již nepracují s původním rovnotlakým cyklem, ale s cyklem smíšeným, při kterém po vznícení roste ve válci tlak i objem palin.

Kromě pístových spalovacích motorů existují ještě motory s rotačním pístem, vyvinuté Němcem Felixem H. Wankelem, tzv. Wankelův motor. Dříve se montovaly do automobilů NSU, Lada nebo Mazda. V dnešní době jej můžeme nalézt v Mazdě RX-8, sériová výroba však skončila v roce 2012. Nicméně automobilka Mazda v budoucnu zvažuje oživení tohoto motoru ve svých modelech.

## **2 Zhodnocení současného stavu**

Vývoj pístových spalovacích motorů pokračuje stále velkým tempem dál. Trendem dnešní doby je zmenšování zdvihového objemu, tzv. „downsizing“, při zachování nebo nárůstu výkonových parametrů a současném použití přeplňování, ať už turbodmychadlem nebo mechanickým dmychadlem, anebo kombinací těchto variant. Dále je zde hybridní pohon, ten se rozšiřuje stále rychleji, a to i do segmentu supersportovních vozů. Spojení spalovacího motoru a elektromotoru šetří palivo hlavně při klidné jízdě, součástí jsou mnohé moderní elektronické systémy, jako například Stop-Start, všechny však najdeme i u zážehových a vznětových motorů. Ve vývoji je i spalovací motor pracující ve spolupráci se stlačeným vzduchem.

Dnes je stále větší tlak na snižování emisí a spotřeby paliva, tudíž návrh motoru je jeden velký kompromis mezi tímto a provozními parametry. Optimálně tyto parametry vyladit nelze, protože jeden závisí na druhém. Hledá se tak ten nejvhodnější kompromis, a zde se uplatní simulační programy, které mohou ušetřit značnou část nákladů na vývoj jedné z nejdůležitějších částí automobilu, motoru. A tyto výdaje jsou v dnešní době klíčové z hlediska konečné ceny automobilu, která mnohdy rozhoduje o úspěchu a neúspěchu výrobce na trhu.

### **2.1 Teorie spalovacích motorů**

Pístový spalovací motor je tepelný stroj, který přeměňuje chemickou energii obsaženou v palivu na mechanickou práci. Chemická energie se převede na tepelnou energii prostřednictvím oxidace paliva (spalováním), tím se zvyšuje teplota a tlak ve válci motoru, plyn expanduje a tím působí na píst, který vykonává práci, ta je převedena pomocí pístního čepu a ojnice na rotující hřídel, jenž je na výstupu z motoru připojen k převodovému ústrojí. Můžeme je dělit na motory:

- S vnitřním spalováním
- S vnějším spalováním

### **2.1.1 Rozdělení pístových spalovacích motorů**

Několik desetiletí vývoje dalo vzniknout různým druhům spalovacích motorů se zdvihovými i rotačními písty. Podrobné třídění, názvosloví a definice tohoto druhu spalovacích motorů jsou u nás směrodatné normy ČSN 09 0022. Zpravidla se pístové spalovací motory dělí podle těchto hlavních hledisek:

- a) Druh paliva
- b) Způsob tvorby směsi
- c) Způsob výměny náplně válců
- d) Způsob zapalování směsi
- e) Průběh spalování
- f) Konstrukční provedení
- g) Účel a použití motoru

#### **Druh paliva**

Motory se podle druhu použitého paliva dělí na dvě hlavní skupiny. Plynové motory a motory na kapalná paliva, buď snadno odpařitelná, jako benzín, nebo těžší, nesnadno odpařitelná, jako například motorová nafta. Nejpoužívanější motory na kapalná paliva:

- Benzínové – převážně k pohonu silničních vozidel (motocykly, osobní automobily, popřípadě menší letadla). Používá se i pro motory ke sportovním, hospodářským a jiným účelům
- Naftové – většinou pro pohon nákladních automobilů, traktorů, stavebních a zemědělských strojů, ale v poslední několika letech ve velké míře i u osobních automobilů. Naftové jsou i motory průmyslové, elektrárenské, lodní a železniční.
- Metanol a Etanol – zejména v severních zemích je toto palivo rozšířené

Kvůli vysoké ceně a stále se ztenčující zásobě ropy je velká poptávka po automobilech na plynná paliva, mezi ně patří LPG (propan-butan) a CNG (stlačený zemní plyn)

## Způsob tvorby směsi

Směs paliva se vzduchem se tvoří buď před (vnější) nebo až uvnitř válcové jednotky motoru (vnitřní).

Před válcovou jednotkou se tvoří směs především u motoru na homogenní směs (obvykle s elektrickým zážehem) ve směšovací zařízení, pracujícím s dynamickým tlakem proudu nebo statickým přetlakem paliva (vstřikovače, vyfukovací ventily v sacím/plnicím traktu). Proudové přístroje zajišťují smíšení paliva a vzduchu, případně rozprášení a částečné odpaření kapalného paliva a bývají i spojeny s ústrojím množstevní regulace. Vstřikovací nebo vyfukovací zařízení je možno přesně a pružně regulovat s využitím elektronických prvků. Mimo regulace dávky paliva je ovšem nezbytné ovlivňovat i průtok vzduchu nebo směsi pro množstevní regulaci a dodržení nutného přebytku vzduchu. Vstřikování dnes u automobilů převládá, a to v podobě jednobodového nebo vícebodového, u motocyklů se karburátor ještě poměrně dost používá. Spalování homogenní nebo lokálně homogenní směsi.

Uvnitř válce motoru se tvoří tradičně směs obvykle vstřikem regulované dávky paliva vysokotlakým čerpadlem, nejčastěji u vznětových motorů na těžko odpařitelná kapalná paliva, například motorová nafta. Velký rozsah kvalitativní regulace při spalování heterogenní směsi, menší citlivost na přebytek vzduchu i na vlastnosti paliva, možnost zápalu jak vznětem, tak zážehem a odstranění úniku směsi do výfuku při proplachování vede dnes k prosazování tohoto systému také u motorů zážehových, jak dvoudobých tak i čtyřdobých.

## Způsob výměny náplně válců

Podle tohoto způsobu lze dělit motory dvojím způsobem na:

- Dvoudobé - výfuk spalin probíhá na konci expanzního zdvihu, po otevření výfukových ventilů nebo kanálů. Spaliny unikají nejprve vlastním přetlakem a teprve po dostatečném poklesu tlaku ve válci se otevrou plnicí kanály a zbytek spalin se vyplachuje čerstvou směsí nebo vzduchem, dodávaným dmychadlem. Při tom se válec naplní čerstvou náplní, jež se při kompresi stlačí jako u čtyřdobých spalovacích motorů

- Čtyřdobé - výfukové ventily se otevírají před koncem expanzního zdvihu, přes ně spaliny přetlakem unikají z válce. Jejich zbytek se vytlačuje pístem při výfukovém zdvihu. Při zdvihu nasávacím se čerstvá směs nebo vzduch do válce nasávají a následně stlačí při kompresním zdvihu pístu

Čerstvá směs se do válců dodává přibližně s atmosférickým tlakem (atmosférické plnění), nebo lze motor plnit vyšším tlakem – přeplňování motoru.

### Způsob zapalování směsi

Zapalování směsi je převážně dvojí:

- Umělé zažehnutí směsi (zážehové) pomocí zapalovací svíčky. Je to obvyklý způsob zapalování předem připravené směsi paliva a vzduchu u benzínových a plynových motorů. Směs je stlačená pod teplotu samovznícení (kompresní poměr obvykle maximálně 12)
- Samočinné vznícení (vznětové) vstřikovaného paliva teplotou po kompresi u motoru s vysokým kompresním poměrem (20-25). Běžné u naftových motorů

### Průběh spalování

Závisí na způsobu tvoření směsi, zápalu a druhu plamene. Obecně není ničím zdůvodněná představa o spíše izochorickém přívodu tepla v zážehových a smíšeném ve vznětových motorech. Vznětový motor vyžaduje robustnější konstrukci kvůli vyšším spalovacím tlakům.

### Konstrukční provedení

Podle celkového konstrukčního provedení se spalovací motory obvykle dělí podle:

- Počtu zdvihů připadajících na jeden pracovní oběh (dvoudobé a čtyřdobé)
- Počtu pístů v jednom pracovním válci (jednopístové a dvoupístové)
- Počtu pracovních ploch jednoho pístu (jednočinné a dvojčinné)
- Pohybu pístu (zdvihové a rotační)
- Způsobu chlazení (kapalinou a vzduchem)
- Průměru pracovního válce (malé –  $D < 150\text{mm}$ ; střední –  $D=150 - 500\text{ mm}$ ; velké –  $D > 500\text{ mm}$ )

- Počtu válců:
  - jednoválcové s jedním spalovacím prostorem bez ohledu na počet pístů
  - dvou- a víceválcové, nejčastěji se 3 až 12, popř. i 16, 18 a 20 válci
  - mnohoválcové se 24, 32 až 42 a někdy i více válci
- Polohy a uspořádání válců (stojaté, ležaté, šikmé, visuté)
- Druhu klikového mechanismu (křížákové a bez křížáku)
- Počtu a polohy klikového hřídele (jedno-, dvou- a vícehřídelové s hřídeli vodorovnými, svislými a šikmými)
- Podle smyslu otáčení klikového hřídele a možnosti jeho změny (na pravotočivé a levotočivé, vratné a nevratné)
- Rychloběžnosti, vyjadřované střední pístovou rychlostí  $c_s$  na:
  - Volnoběžné  $s \ c_s < 7,5 \text{ m/s}$  při  $D < \mathbf{160 \text{ mm}}$   
 $s \ c_s < 6,5 \text{ m/s}$  při  $D > \mathbf{160 \text{ mm}}$
  - Rychloběžné  $s \ c_s > 7,5 \text{ m/s}$  resp.  $c_s > 6,5 \text{ m/s}$
- Podle způsobu plnění
  - Atmosférické
  - Přepřňované
- Podle konstrukce rozvodu pracovní látky
  - Ventilové
    - OHV (OverHeadValve)
    - OHC (OverHeadCamshaft)
    - DOHC (Double OHC)
    - SV (SideValve)
  - Šoupátkové (dnes již nepoužívané)
  - Kanálové s jedním, dvěma nebo třemi systémy kanálů, ovládaných jedním nebo dvěma písty (dvoudobé motory)
  - Se smíšeným rozvodem ventilovým (OHV) a kanálovým (dvoudobé motory)
- Podle počtu ventilů v jedné hlavě 2, 3 (obě možnosti), 4, 5, 6 ventilové
- Podle strany výfukového potrubí (pravé, levé), má význam z hlediska obsluhy, která se umísťuje na opačné straně [1]

## Účel a použití motoru

Podle tohoto hlediska se motory dělí na:

- Průmyslové
  - Stacionární – motor uložený na pevném základu
  - Mobilní – přemístitelný motor uložený na přenosném rámu, podvozku, nebo na vozidle, ale jen pro pohon pracovního mechanismu
- Dopravní
  - Vozidlové – pro pohon silničních, terénních a jiných strojů. Například motocyklové, automobilové, traktorové a jiné motory
  - Dráhové – motor pro pohon všech kolejových vozidel
  - Lodní – k použití v plavidlech všeho druhu pro námořní i vnitrozemskou plavbu
  - Letadlové – pro pohon letadel
  - Speciální – různé motory dle svého zvláštního účelu a použití, například pro vojenské účely

### **2.1.2 Princip funkce pístového spalovacího motoru**

Pístové spalovací motory lze rozdělit na čtyři hlavní druhy:

- Dle druhu paliva, tvoření směsi, zapalování a průběhu spalování rozlišujeme dvě hlavní skupiny:
  - Zážehové (Ottovy motory)
  - Vznětové (Dieselovy motory)
- Dle způsobu výměny náplně ve válci dělíme motory na další dvě skupiny na:
  - Dvoudobé
  - Čtyřdobé

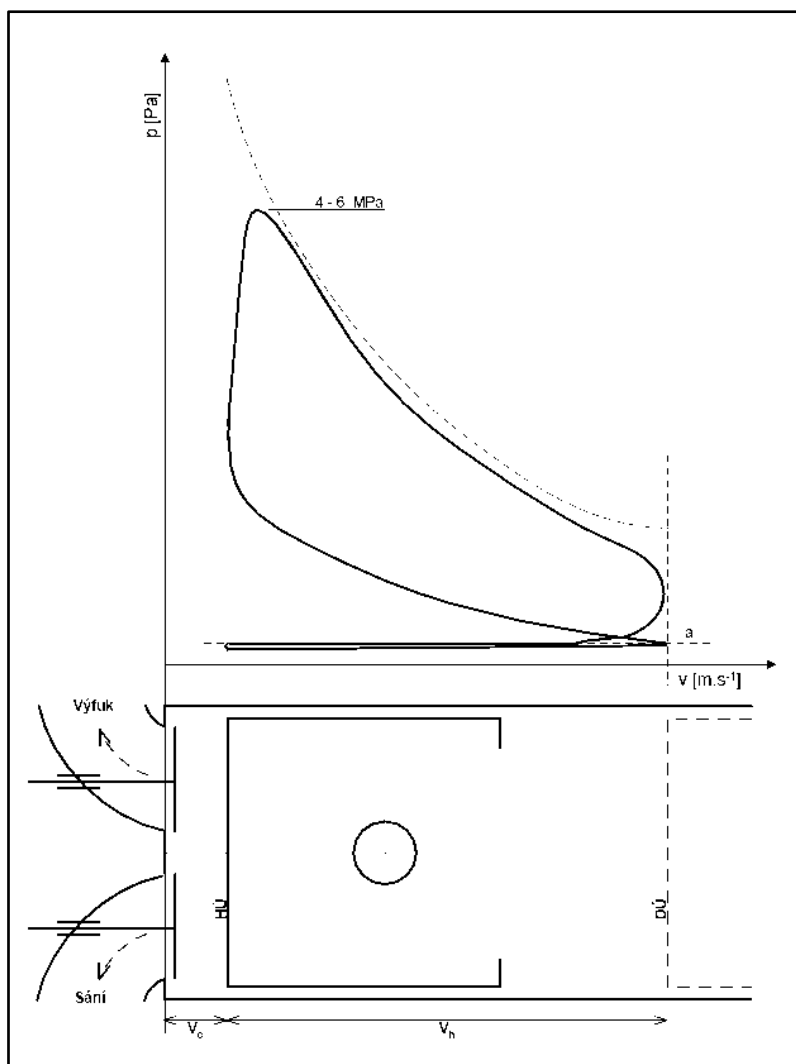
Při tom dvoudobé a čtyřdobé můžou být zážehové i vznětové, nebo nepřepřňované a přeplňované, nejčastěji turbodmychadlem či mechanickým dmychadlem. Jedná se o periodicky pracující stroje, kde určité množství pracovní látky proudí do válce, tak vykoná práci a poté se vytlačí ven z válce. Toto se nazývá výměna náplně. Měla by probíhat tak, aby se beze zbytku odstranily výfukové plyny a válec se znovu naplnil čerstvou směsí.

## Zážehové motory

Ottův motor (N. A. Otto 1832-1891) je charakterizuje stlačením směsi paliva a vzduchu a její následné zapálení elektrickou jiskrou. Směs paliva a vzduchu se tvoří buď vně válců, nebo vstřikováním paliva do sacího potrubí či přímým vstřikem do přímo do válce.

U čtyřdobých zážehových motorů se jeden pracovní oběh uskuteční během čtyř zdvihů pístu, to znamená dvou otáček klikového hřídele. Fáze oběhu:

- Sání
- Komprese
- Expanze
- Výfuk



Obr 3-1: Indikátorový diagram pro čtyřdobý zážehový motor [1]



Výměnu náplně válce zajišťuje obvykle píst s pomocí rozvodových součástí, nejčastěji talířových ventilů, které jsou ovládány rozvodovým mechanismem. Rozvodové ventily se otevírají nuceně. Zavírání ventilů obvykle zajišťují pružiny, existuje ale také nucené zavírání ventilů (Desmodromický rozvod – Obr. 2-5).

**1. Sání** - Nasávání čerstvé směsi do válce probíhá při sacím zdvihu pístu, kdy se píst pohybuje z horní úvrati (HÚ) do dolní úvrati (DÚ). Při tom dochází ve válci k podtlaku, a sacím ventilem, otevíraným rozvodovým mechanismem s předstihem před HÚ, proudí do válce čerstvá směs paliva. U zážehových motorů je náplň tvořena směsí vzduchu a paliva (tvoří se před vstupem do válce - karburátor, vstřikovací tryska) nebo u motorů se vstřikováním benzínu do válce se nasává jen vzduch a směs se vytváří až ve válci. Nasávaná náplň se od stěn spalovacího prostoru ohřívá a mísí se se spaliny zbylými ve válci z minulého výfukového zdvihu.

**2. Komprese** - Na začátku kompresního zdvihu pístu se zavře sací ventil. Náplň válce (směs vzduchu a paliva nebo jen vzduch) se stlačuje, s tím vzrůstá také její teplota. Kompresní tlak a teplota jsou závislé převážně na velikosti kompresního poměru  $\epsilon$ . Před koncem kompresního zdvihu se palivová směs zapaluje elektrickou jiskrou, vytvořenou mezi elektrodami zapalovací svíčky s vhodným předstihem. Zážehnutá směs pak shoří za současného stoupání tlaku a teploty v okolí HÚ.

**3. Expanze** - Při třetím, expanzním zdvihu, směs paliva se vzduchem ve válci dohořívá. Při tom asi při 5 až 10° otočení klikového hřídele za HÚ dosahuje tlak, a o něco později i teplota náplně válce, maximum. Spaliny působí na písty pohybující se k DÚ. Píst přitom vykonává užitečnou práci. Během expanze tlak a teplota spalin klesají. Před koncem zdvihu se otevře výfukový ventil a spaliny unikají se značným tlakovým spádem z válce do okolí.

**4. Výfuk** - Během posledního, výfukového zdvihu pístu při pohybu z DÚ do HÚ vytlačuje zbytek spalin otevřeným výfukovým ventilem z válce. Zpravidla před koncem výfukového zdvihu se otevírá sací ventil, kdežto výfukový ventil se zavírá později, až za HÚ. Ve chvíli současného otevření sacího i výfukového ventilu nastává při vhodných podmínkách v sacím a výfukovém potrubí propláchnutí spalovacího prostoru a vypláchnutí části zbytku spalin z válce motoru.

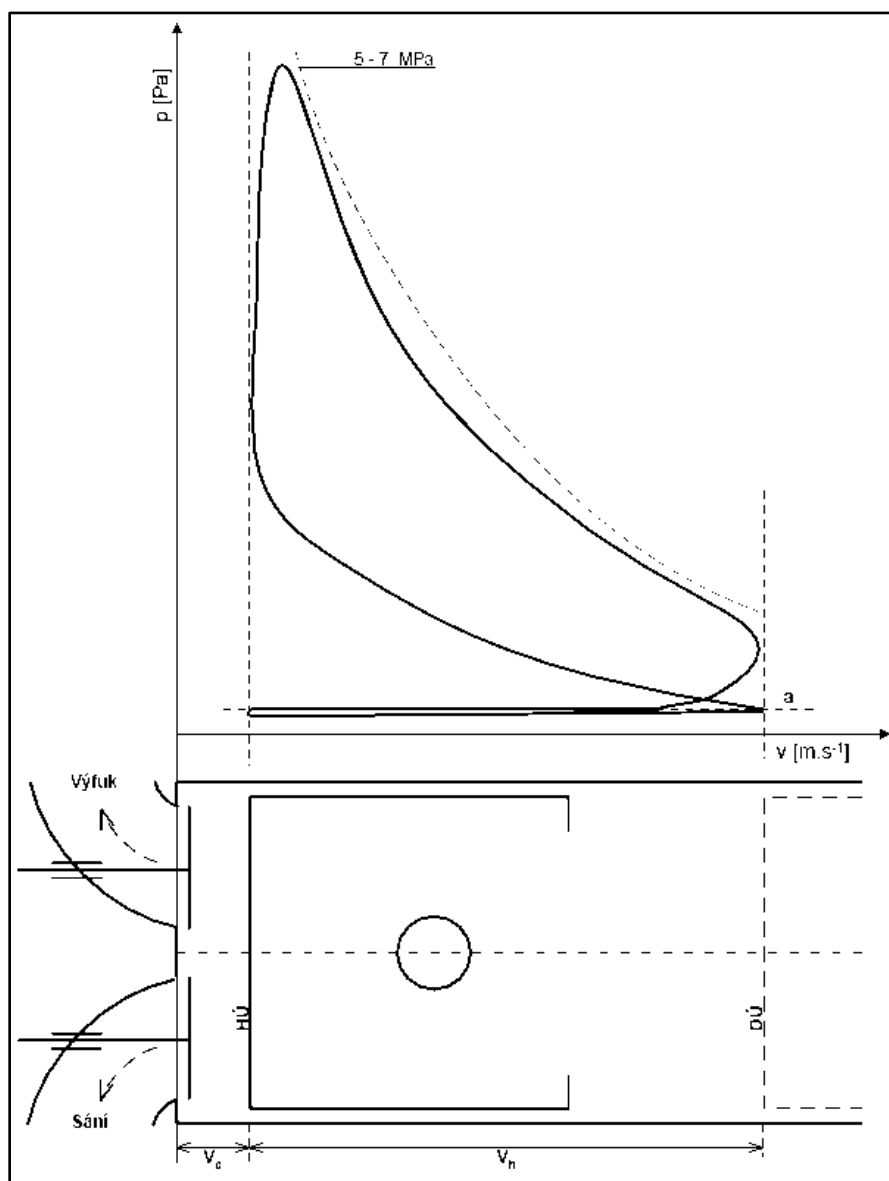
Tím je cyklus ukončen a začíná sací zdvih dalšího oběhu. Důležitou hodnotou jsou maximální spalovací tlaky, které ovlivňují hlavně dimenzování hlavních částí motoru. Velikost závisí na druhu motoru, velikosti, rychloběžnosti, na palivu, konstrukčním provedení, kompresním poměru a stupni přeplňování. U motorů bez přeplňování dosahují maximální tlaky hodnot 4-6 MPa, u přeplňovaných i 15 MPa. [1]

## Čtyřdobý vznětový motor

Pro Dieselův motor (R. Diesel 1858-1913) je charakteristická komprese vzduchu a vstříknutí paliva pod vysokým tlakem do válce. Zápalná směs se tvoří ve válci. K zapálení směsi dochází samočinně vlivem vysoké kompresní teploty.

U vznětových motorů se, podobně jako u zážehových, jeden pracovní oběh uskuteční během čtyř zdvihů pístu.

- Sání
- Komprese
- Expanze
- Výfuk



Obr 3-2 Indikátorový diagram pro čtyřdobý vznětový motor [1]

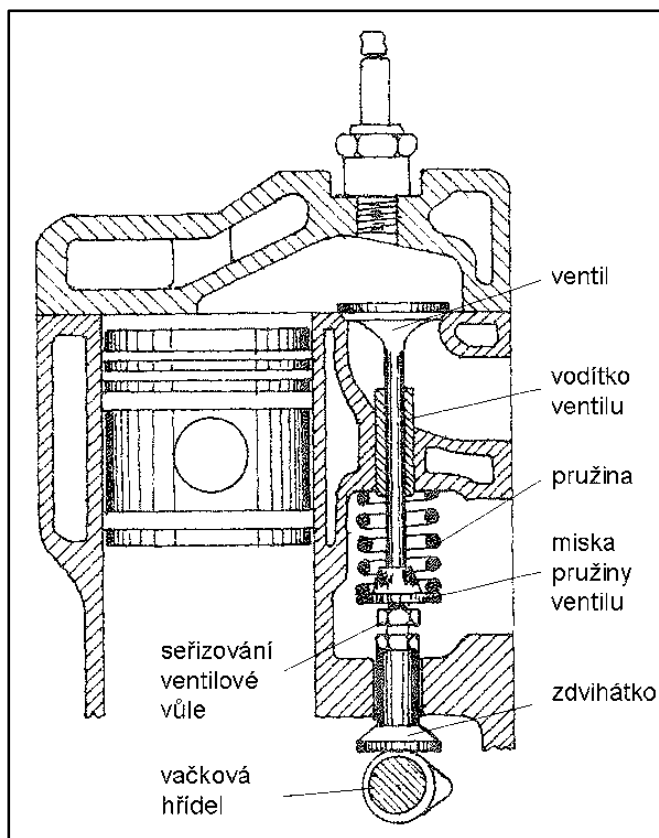
### 2.1.3 Ventilový rozvod

V této práci se zabývám motorem s ventilovým rozvodem, proto v následující podkapitole přiblížím náhled na jeho konstrukční provedení a funkci.

Jedná se o mechanické zařízení řídící pomocí otevírání a zavírání ventilů výměnu náplně válce. Rozvod je poháněn z klikové hřídele pomocí řemene, řetězem nebo ozubenými koly. Vačková hřídel řídí otevírání a zavírání sacích a výfukových ventilů a to buď přímo nebo nepřímo přes vahadla, tyčky nebo zdvihátka. Z principu čtyřdobých motorů vychází, že na čtyři otáčky klikové hřídele připadají dvě otáčky vačkové hřídele.

#### SV - SideValves

Ventily jsou umístěny v bloku motoru. Tyto ventily jsou poháněny zespodu vačkovou hřídelí. Přestaly se používat pro svůj nevyhovující tvar spalovacího prostoru. Mezi další nevýhody patří nemožnost změny kompresního poměru. Výhodou tohoto rozvodu je nízká hmotnost a levná výroba. Výhodné je také to, že se při porušení nemůžou potkat ventily s pístem.

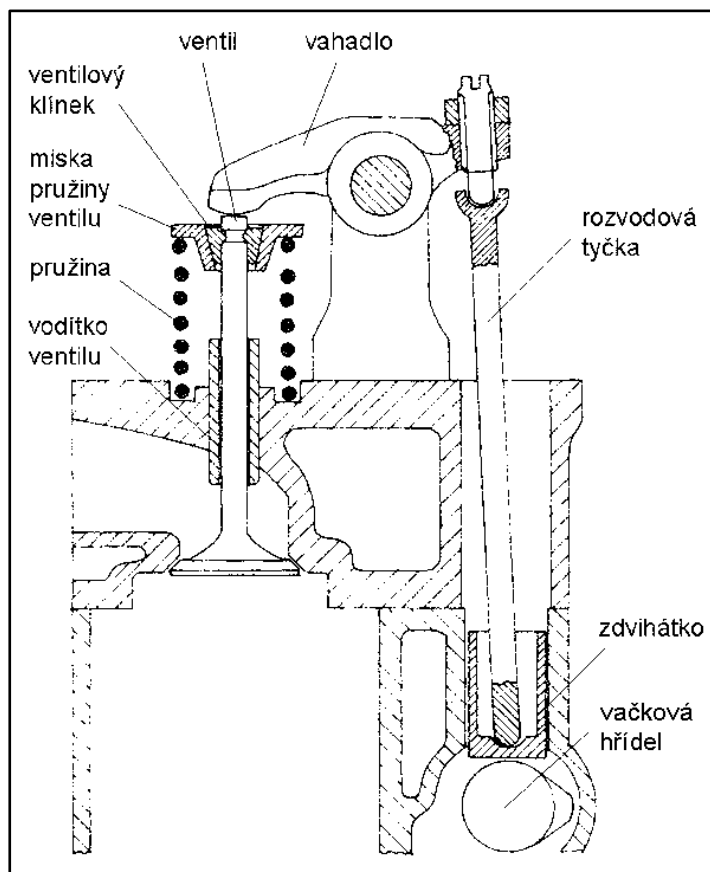


Obr. 2-1: Ventilový rozvod SV [2]

## OHV - OverHeadValves

U této konstrukce jsou ventily v hlavě válců a vačková hřídel je umístěna v bloku motoru. Pomocí zdvihátka, zdvihací tyčky a vahadla je pak veden mechanický přenos mezi ventilem a vačkou. Nevýhodou je velký počet dílů, proto je konstrukce méně tuhá a navíc všechny díly zvyšují hmotnost pohyblivých částí, které vrací pružina zpět.

Vačková hřídel je poblíž klikové hřídele, její pohon je tak jednodušší, většinou pomocí ozubení nebo řetězem. Tento rozvod se nehodí pro vysokootáčkové motory, a proto se v dnešní době u automobilů téměř nevyskytuje.

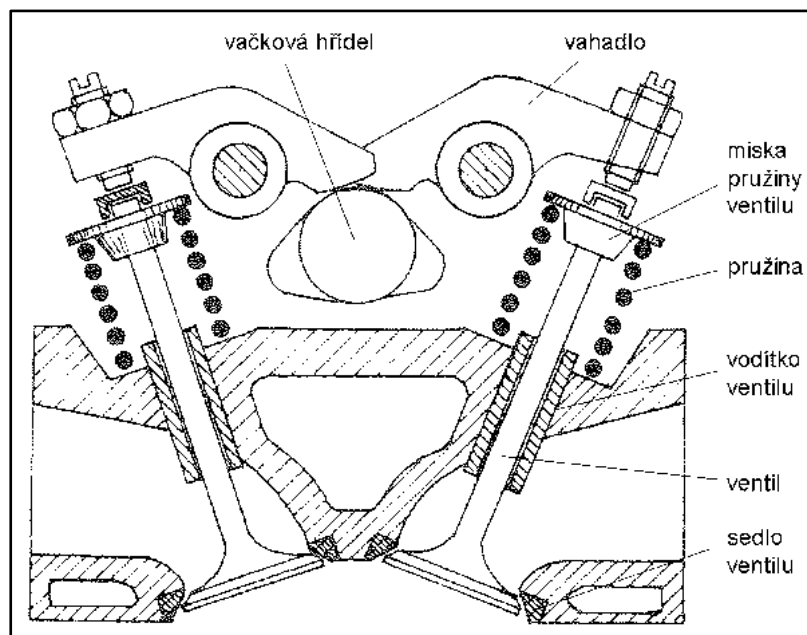


Obr. 2-2: Ventilový rozvod OHV [2]

## OHC - OverHeadCamshaft

Vidět můžeme také označení SOHC (Single OHC). Vačková hřídel i ventily jsou umístěny v hlavě motoru.

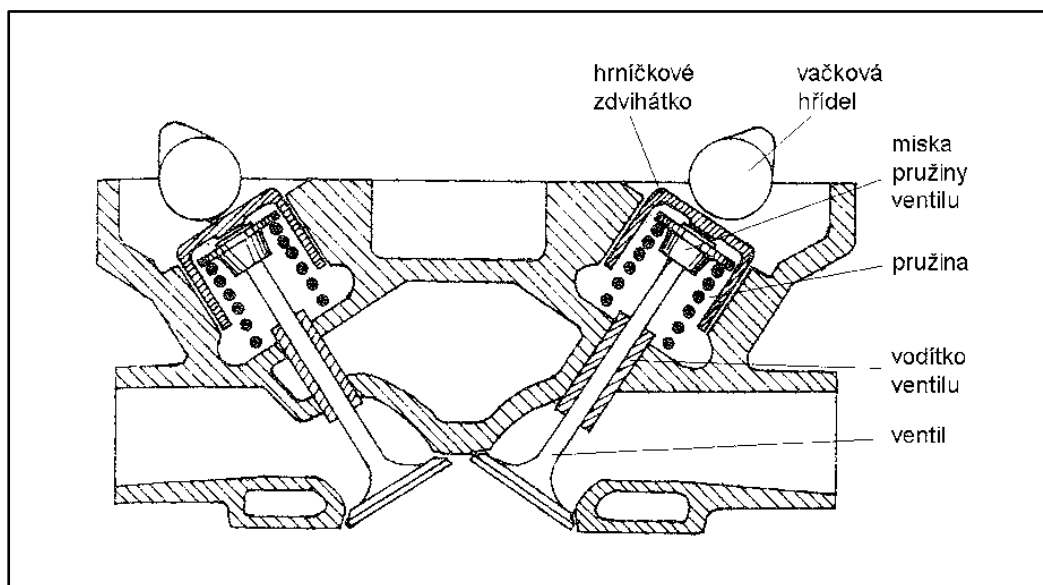
Protože je vačková hřídel umístěna v hlavě válců, musí se pohon přenést až k hlavě válců. Obvykle to je řešeno ozubeným řemenem, řetězem nebo někdy i ozubeným převodem. U těchto typů je splněna podmínka, že musí být přesně definována poloha vačkové hřídele vůči klikové hřídeli, aby bylo zajištěno správné časování otevírání ventilů. Nevýhodou u této konstrukce je složitá konstrukce hlavy válců.



Obr. 2-3: Ventilový rozvod OHC [2]

### DOHC - Double OverHeadCamshaft

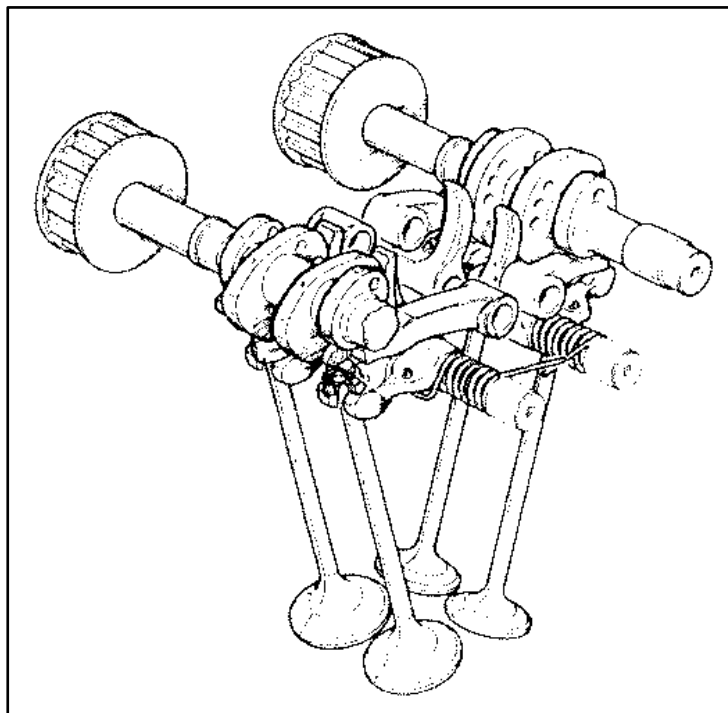
Používá se většinou u čtyř a pěti-ventilového uspořádání, kde jedna vačková hřídel ovládá dva (nebo tři) sací a druhá dva výfukové ventily. V podstatě se jedná o modernizaci rozvodů OHC.



Obr. 2-4: Ventilový rozvod DOHC [2]

## Desmodromický rozvod

U vysokootáčkových motorů některých motocyklů nebo závodních vozů nastávají problémy s tím, že pružina nestíhá ventil vracet. Bývají také problémy s životností celého mechanismu. Řešením je pneumatické ovládání ventilů nebo desmodromický rozvod, u kterého jedna vačková hřídel ventil otevírá a druhá zavírá. Tento rozvod je výsadou značky Ducati.



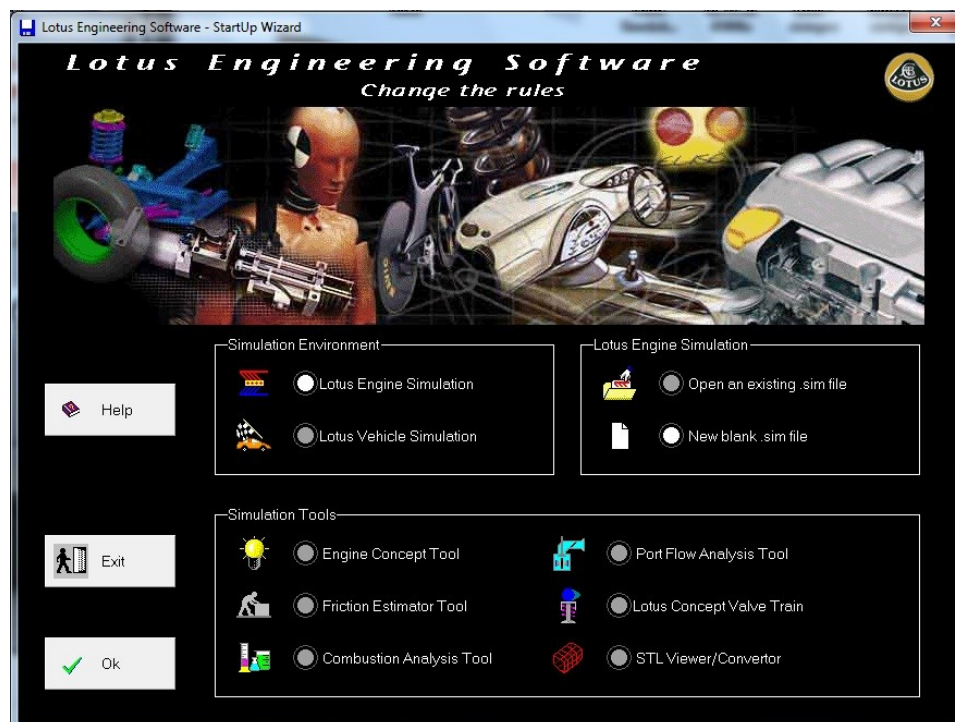
Obr. 2-5: Desmodromický rozvod [2]

## **2.2 Software používaný při vývoji pístových spalovacích motorů**

V této kapitole se věnuji softwarům používaným při návrhu motoru, jedná se o 3 programy, Ricardo Wave, GT-Power a mnou používaný Lotus Engine Simulation. Popisuji zde jejich použití a funkce.

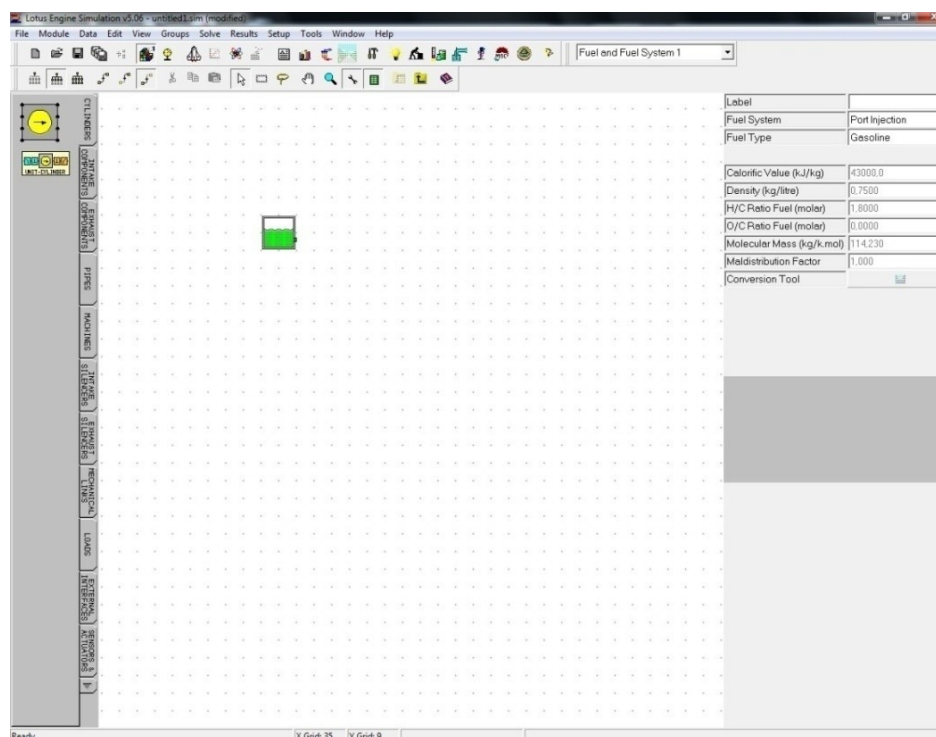
### **2.2.1 Lotus Engine Simulation**

Jedním ze simulačních programů, ve kterém budu provádět simulaci, vyvinula firma Lotus, nazývá se Lotus Engine Simulation. K dispozici je freeware verze pro jednoválcový motor, k níž není potřeba žádný licenční soubor. Dále je zde možnost trvalé nebo obnovitelné licence, všechny komerční licence jsou dodávány s plnou online podporou. Existuje i akademická licence, využívaná pro účely výzkumu a vývoje v akademickém prostředí. Lotus nabízí i vzdělávací kurzy pro všechny softwarové produkty.



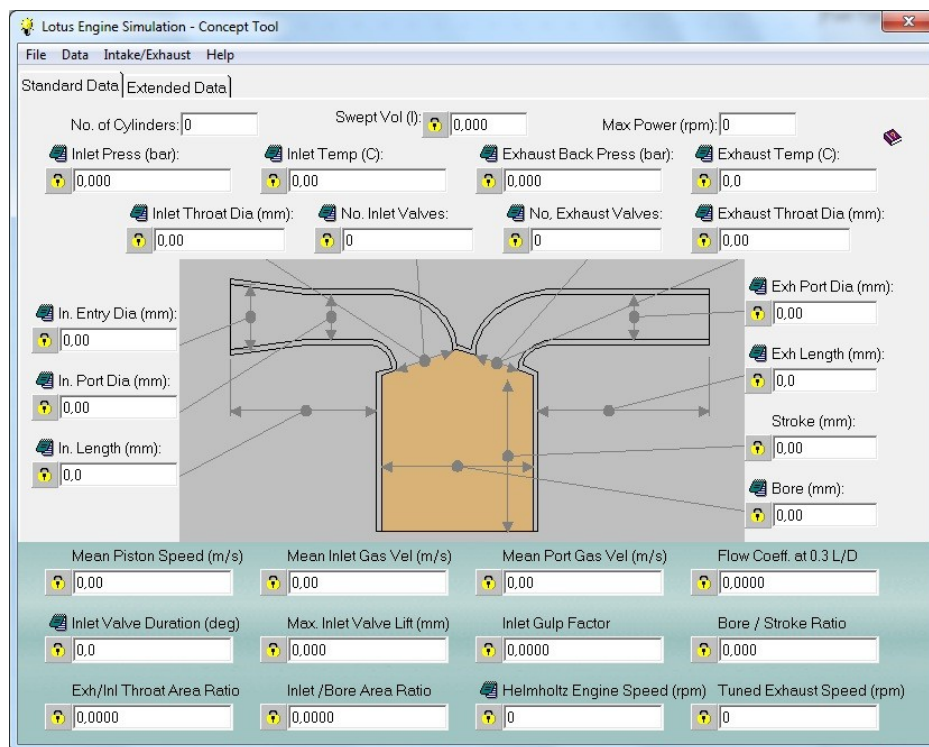
Obr. 2-6: Průvodce [autor]

Jedná se o modelovací prostředí pro odhad výkonových parametrů a jejich optimalizaci, a to jak pro dvou tak pro čtyřtákní motory. Má intuitivní uživatelské rozhraní, které umožní rychlé sestavení modelu a jeho následnou kontrolu. Zabudované postprocesní nástroje umožňují konstruktérům získat cenné informace o parametrech jejich motoru.



Obr. 2-7: Základní pracovní plocha [autor]

Jednotlivé fáze vývoje často vyžadují simulační model, který značně urychlí návrh motoru, a to s omezenými dostupnými údaji. Nástroje Lotus používají pokyny pro vytvoření realistického modelu motoru s minimálními vstupními údaji. Rovnice zachování energie, hybnosti a stavová rovnice se používají pro získání výchozí hodnoty pro délku a průměr potrubí.



Obr. 2-8: Rozměry potrubí a válce [autor]

Pro tvorbu modelu si lze vybrat z tool boxu potřebné komponenty jako jsou válce, ventily, ovládací mechanismy pro ventily, chladiče, mechanické kompresory nebo turbodmychadla. Tyto modely umožňují přesnou reprezentaci fyzické součásti v jednorozměrném modelu. Mohou být namodelovány v libovolné kombinaci, při tvorbě je aktivní kontrola chybného propojení součástí.

Optimalizaci výkonu motoru dosáhneme rychle pomocí integrovaného optimalizačního nástroje, to umožňuje uživateli provádět parametrické studie bez nutnosti vyhodnocení úplné zkoušky.

Výsledky simulací lze hodnotit okamžitě pomocí výkonného grafického nástroje. Lze si je vykreslit díky dynamickému zobrazování dat, to umožňuje podrobný pohled na výsledky simulace.

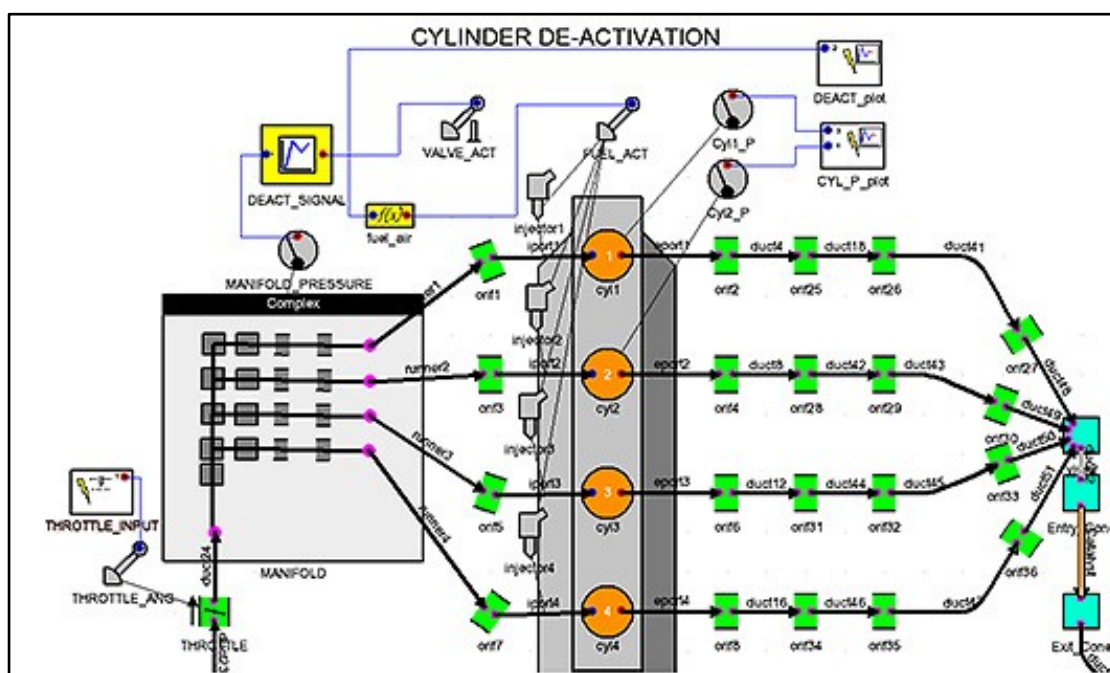


### 2.2.2 Ricardo Wave

Dalším ze simulačních programů je produkt od firmy Ricardo, nazvaný Wave. Je jedním z nejrozšířenějších softwarů, používaný na celém světě v různých odvětvích, má široké využití, například ve výrobě elektrické energie, v námořním a železničním průmyslu, dále v motorsportu a také pro motocykly a u nákladních i osobních automobilů.

Program můžeme použít i pro optimalizaci kompletního motoru od sacího po výfukové potrubí, snížení hluku, jsou zde pokročilé modely pro všechny typy spalovacích systémů. Termickou analýzou lze předpokládat typ spalovacího prostoru a teploty součástí výfukového potrubí.

Mezi klíčové vlastnosti patří pokročilé vznětové a zážehové spalovací modely, komplexní 1D a 3D zpracování výfukových plynů, pokročilé akustické charakteristiky. Modely lze stavět rychlým přetažením z knihovny prvků, uživatelsky definovanou šablonou nebo samostatně z komponentů.



Obr. 2-9: Výsledný model v RicardoWave [5]

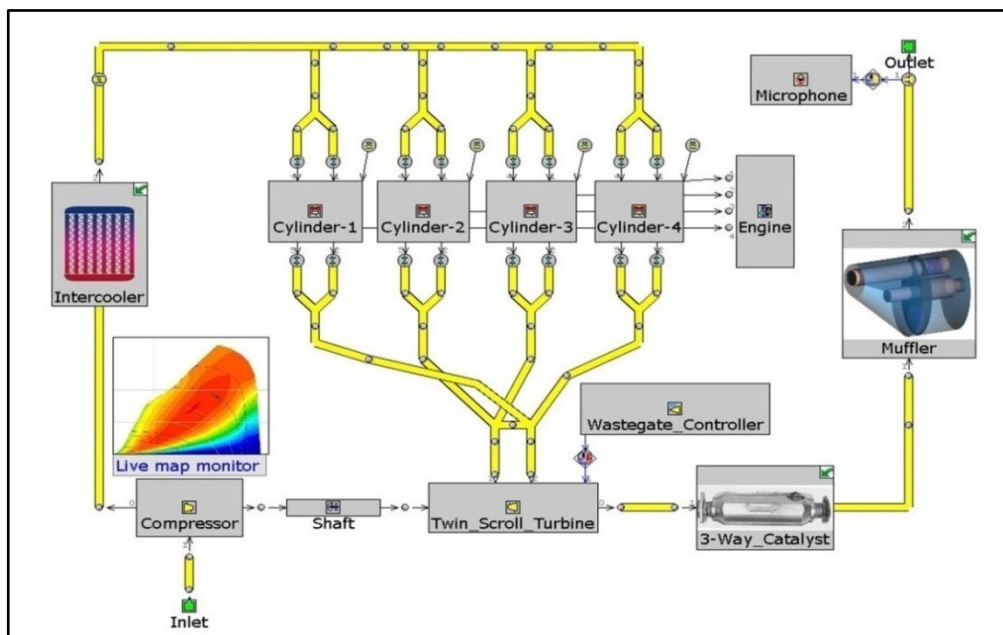
### 2.2.3 GT-Power

Od firmy Gamma Technologies pochází další z programů, GT-Power. Jde o jeden z nejpoužívanějších simulačních programů na trhu, používaný u výrobců motorů pro konstrukční návrhy a vývoj. Software je použitelný pro všechny velikosti a typy motorů u výrobců nákladních i osobních automobilů, motocyklů, též pro zahradní

stroje, v motorsportu, námořní a železniční dopravě, také při výrobě elektrické energie, v hornictví, stavebnictví a zemědělství. GT-Power obsahuje komplexní a pokročilou sadu modelů pro analýzu výkonu motoru, která poskytuje celou řadu funkcí potřebných k analyzování celé řady motorů a jejich vlastností, jako například:

- Křivka točivého momentu a výkonu, proudění vzduchu, účinnost, spotřeba paliva, emise
- Rovnovážný a přechodný stav v různých jízdních situacích
- Přepřehování turbodmychadlem nebo mechanickým kompresorem
- Zážehové, vznětové a speciální vývojové motory
- Vícefázové spalování, vícepalivový systém, přímý vstřik do válce
- Variabilní časování a zdvih ventilů (VVT a VVL)
- Akustická a termická analýza sacího a výfukového potrubí

Program je vysoce přesný pro predikci jevů souvisejících s chodem motoru, řeší je na základě Navier-Stokesovy rovnice. Na tomto základě leží nejmodernější termodynamické modely pro zachycení dopadů spalování, přenosu tepla nebo hoření směsi ve válci.



Obr. 2-10: Výsledný model v GT-Power [6]

GT-Power je licencován jako all-inclusive balíček obsahující řadu pokročilých modelovacích funkcí, které nenajdete u jiných simulačních programů. Řešič pro zkoumání teploty a tepelných toků, dále detailní chemické kinetiky a následné zpracování výfukových plynů, další funkce lze najít v tomto balíčku bez příplatku. Akademická licence stojí 1000 dolarů.

### 3 Teoretický náhled na modelování spalovacích motorů

Použití simulačních softwarů je dnes nedílnou součástí vývoje a optimalizace spalovacích motorů. Tyto programy slouží pro výpočty charakteristik a optimalizaci geometrie sacího a výfukového potrubí bez nutnosti časově i finančně náročného testování nebo analytických výpočtů. Pro mou práci budu využívat program Lotus Engine Simulation. V tomto bodu popisuji fyzikální principy a metodiku tvorby modelu.

#### 3.1 Fyzikální principy

Fyzikální principy slouží jako základ pro výpočty parametrů motoru. Díky nim lze sestavit termodynamický model hoření směsi, model přestupu tepla. Dále proudění potrubím na základě Bernoulliho rovnice, nebo také výměnu náplně válce, k tomu potřebujeme znát termodynamické zákony.

##### 3.1.1 Termodynamický model hoření

Hořením směsi paliva a vzduchu vzniká teplo, jenž jen základem pro přeměnu energie ve spalovacím motoru. Důležité parametry motoru, jako indikovaný výkon a účinnost závisí jak na množství uvolněného tepla, tak také na tom, v jaké fázi pracovního cyklu se teplo uvolní. V ideálním pracovním oběhu se teplo uvolní v horní úvratí v nekonečně krátkém časovém intervalu. U skutečného oběhu se však teplo uvolňuje postupně a nerovnoměrně, a právě tímto uvolňováním se zabývá tento termodynamický model. Ovlivňuje ho především druh paliva, způsob tvorby směsi, tlak a teplota při hoření ve válci.

V současné době neexistují žádné matematické nebo fyzikální vztahy, které by s dostatečnou přesností určily průběh hoření. Účinnější jsou vztahy založené na experimentálně určených parametrech. Takovým vztahem pro stanovení termodynamického modelu hoření je Wiebeho rovnice:

$$x = 1 - e^{-a \cdot y^{m+1}}$$

pro kterou platí:

$$x = \frac{m_B(\varphi)}{m_B}$$

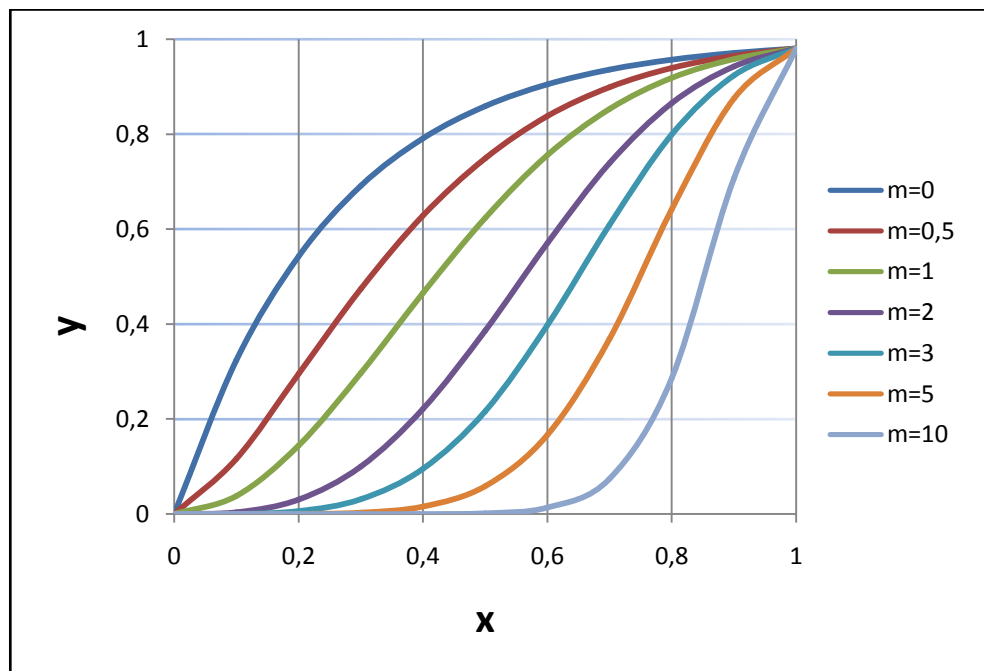
$$y = \frac{t(\varphi)}{t_H}$$

Kde:  $m$  ... Wiebeho parametr charakteristiky hoření  
 $m_B$ ... celková hmotnost paliva [kg]  
 $t_H$ ... celkový čas hoření [s]  
 $m_B(\varphi)$ ... hmotnost paliva, které již shořelo za dobu  $t(\varphi)$

Podíl nespáleného paliva ve válci  $a$  je definován:

$$a = -\ln(1 - \eta_{CH})$$

Kde:  $\eta_{CH}$  ... chemická účinnost

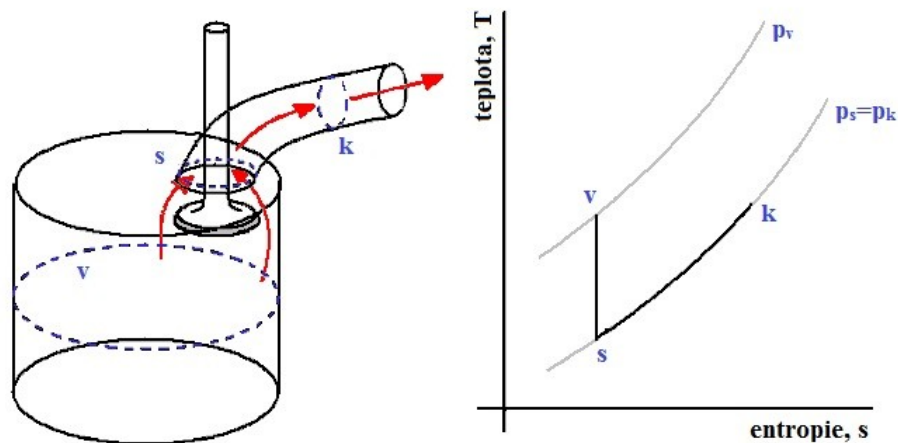


Obr. 3-1: Bezrozměrná funkce prohořívání paliva podle Wiebeho ( $\eta_{CH}=0,98$ ) [autor]

### 3.1.2 Výměna náplně válce

Výměna náplně je ovlivněna hlavně průměrem talíře ventilu, ale také průběhem zdvihu ventilu. V programu LES se volí i typ kanálu. Při simulaci pracovního oběhu spalovacího motoru musíme v každém kroku výpočtu stanovit hmotnosti pracovní náplně, která do válce vstupuje a následně vystupuje přes kontrolní body (Obr. 3-2).

Při určení hmotnostního toku vycházíme ze zákonů termodynamiky. Kontrolní plochy z Obr. 3-2 jsou uvnitř válce (v), v oblasti sedla (s) a ve výfukovém kanálu (k). Předpokladem je adiabatický děj mezi prvními dvěma plochami a poté izobarický děj.



Obr. 3-2: Kontrolní plochy (vlevo) a T-s diagram proudění přes ventil (vpravo) [3]

Vztah pro stanovení hmotnostního toku:

$$\dot{m} = A_{ef} \cdot \sqrt{2 \cdot p_v \cdot \rho_v} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[ \left( \frac{p_k}{p_v} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_k}{p_v} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}$$

kde:  $\kappa$  ... Poissonova konstanta

$p_v$  a  $p_k$ -tlaky v daných plochách [Pa]

$A_{ef}$  ... efektivní plocha, která se spočítá jako:

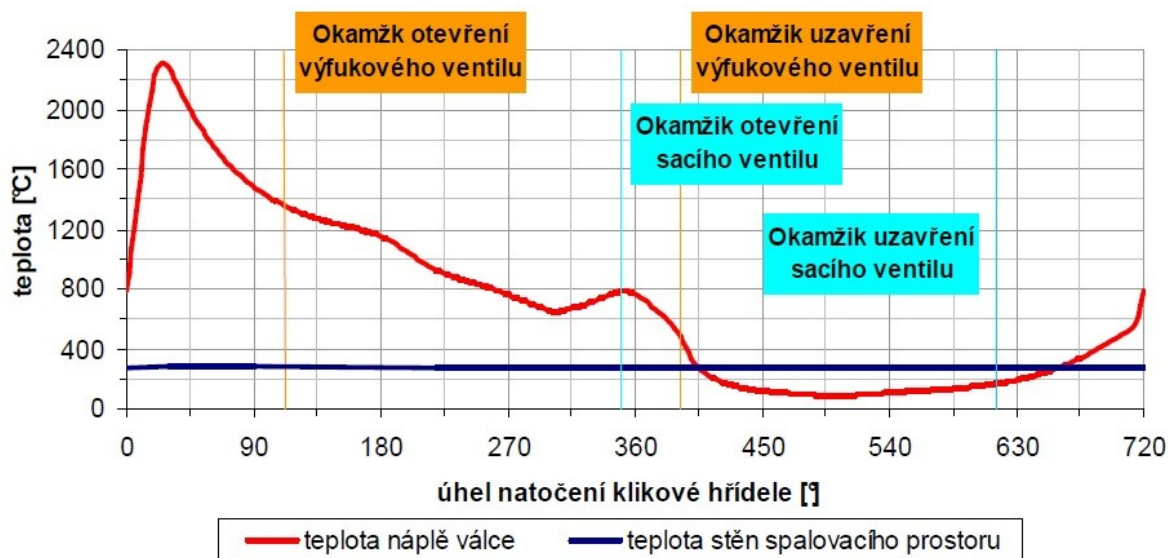
$$A_{ef} = C_f \cdot A_{ref}$$

kde:  $A_{ref}$  ... plocha, kterou proudí plyn z válce do výfukového kanálu (závislá na zdvihu ventilu) [m<sup>2</sup>]

$C_f$  ... empiricky získaný koeficient

### 3.1.3 Termodynamický model přestupu tepla

Vzhledem k intenzivnímu uvolňování tepla během spalování směsi dochází ve válci k výměně tepla mezi stěnami spalovacího prostoru a náplní válce. Orientace i intenzita přestupu tepla se během pracovního cyklu motoru mění. Platí, že při vysokých teplotách náplně válce ohřívá plyn stěny pracovního prostoru, zatímco při nízkých teplotách je náplň ohřívána stěnami. Odvod tepla stěnami válce obecně způsobuje energetickou ztrátu a pokles celkové účinnosti. Navíc ohřev nasávané směsi znamená snížení objemové účinnosti.



Obr. 3-3: Ilustrační průběh teplot náplně a stěn spalovacího prostoru [4]



Obr. 3-4: Ilustrační průběh teplot stěn válce [4]

### Woschniho model přestupu tepla

Tento model slouží k popisu přestupu tepla stěnami válce v průběhu chodu motoru.

Pro přestup tepla existuje základní fyzikální rovnice, ze které se vychází:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A_w (T_w - T)$$

kde:  $\alpha$  ... koeficient přestupu tepla

$A_w$ ... aktuální plocha stěn válce [m<sup>2</sup>]

$T_w$ ... teplota stěny válce [K]

$T$  ... teplota plynu náplně válce [K]

Woschniho model nám slouží k určení koeficientu přestupu tepla v závislosti na podmínkách ve válci (aktuální rychlost a typ proudění, teplota, tlak...). Lotus Engine simulation pracuje s tímto vztahem pro koeficient přestupu tepla:

$$\alpha = A \cdot d^{\bar{m}-1} \cdot p^{\bar{m}} \cdot T^{(0,75-1,62)} \cdot (B \cdot c_m + C \cdot c_v + D'' \cdot \frac{V_z \cdot T_1}{p_1 \cdot V_1} \cdot (p - p_0))$$

kde: A, B, C, D jsou koeficienty Woschniho modelu

$V_z$  ... zdvihový objem motoru [ $m^3$ ]

$V_1$  ... objem plynů na začátku spalování [ $m^3$ ]

$d$  ... vrtání válce [mm]

$T$  ... teplota válce [K]

$T_1$ ... teplota na začátku spalování [K]

$p_1$ ... tlak na začátku spalování [Pa]

$p$  ... tlak ve válci [Pa]

Vzorec obsahuje i střední rychlost víření  $c_v$  a tlak při kompresi  $p_0$ , ty se vypočítají:

$$c_v = \frac{n \cdot \pi \cdot d \cdot S_r}{30}$$

$$p_0 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_v}\right)^G$$

kde:  $n$  ... otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]

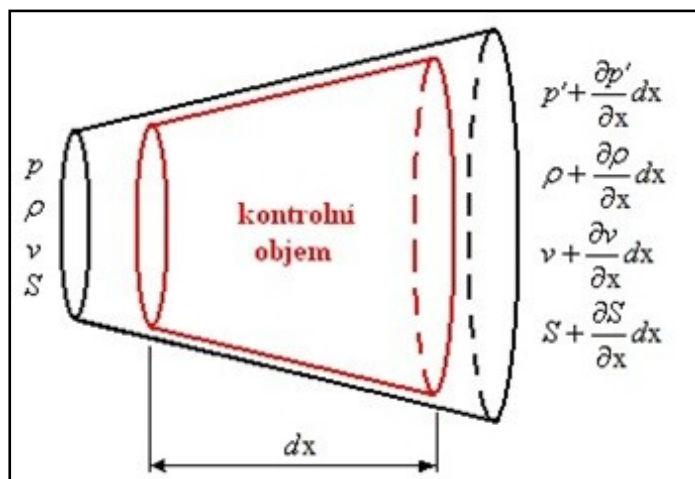
$V_v$  ... objem válce [ $m^3$ ]

$S_r$  a  $G$  jsou další koeficienty Woschniho modelu

### 3.1.4 Výpočet proudění plynu potrubím

Na základě rovnice kontinuity, zákonu o rovnováze sil a zachování energie se stanoví pro každý element potrubí a pro každé elementární natočení klikové hřídele hodnoty stavových veličin a rychlosti.

Předpokládejme, že proud stlačitelné tekutiny protéká skrze elementární část potrubí (kontrolním objemem). Ta je tvořena stěnami potrubí a plochami, jenž jsou kolmé na osu proudění. Průměr potrubí se přitom mění, jak lze vidět na obrázku. Rychlost proudění  $v$  je v obecném případě nerovnoměrná, ale rozložení rychlosti po průřezu  $S$  uvažujeme konstantní. [4]



Obr. 3-5: Kontrolní objem [3]

Potom lze obecnou rovnici kontinuity pro jednorozměrné proudění následovně:

$$\frac{\partial(\rho \cdot S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot S)}{\partial x} = 0$$

kde:  $\rho$  ... hustota tekutiny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$p$  ... tlak [Pa]

$t$  ... čas [s]

$x$  ... posunutí [mm]

Při proudění tekutiny vznikají normálová napětí od tlaku tekutiny a napětí tečné vlivem třecích sil. Na tekutinu působí i síly od vlastního pohybu částic. Následující rovnice vyjadřuje zákon o rovnováze sil, působících na kontrolní objem.

$$\frac{\partial(\rho \cdot v \cdot S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v^2 + p)}{\partial x} - p \cdot \frac{dS}{dx} + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot f \cdot \pi \cdot D' = 0$$

kde:  $f$  ... součinitel tření mezi tekutinou a stěnou potrubí

$D'$  ... hydraulický průměr potrubí [mm]

Hodnota součinitele tření může být zadána buď přímo, nebo nepřímo. Volbou materiálu se dá také nepřímo stanovit drsnost povrchu.



Bernoulliho rovnice se zapíše jako:

$$\frac{\partial(\rho \cdot e_0 \cdot S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot h_0 \cdot S)}{\partial x} - q \cdot \rho \cdot S = 0$$

kde:  $e_0$  ... ztrátová energie [J]

$h_0$ ... ztrátová entalpie tekutiny [m]

$q$  ... vyměněné teplo mezi tekutinou a stěnami potrubí, které je určeno:

$$q = \frac{2 \cdot f \cdot v \cdot \kappa \cdot R}{D \cdot (\kappa' - 1)} (T_w - T_g)$$

kde:  $R$  ... molární plynová konstanta [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]

$T_w$ ... teplota stěny [K]

$T_g$  ... teplota plynu [K]

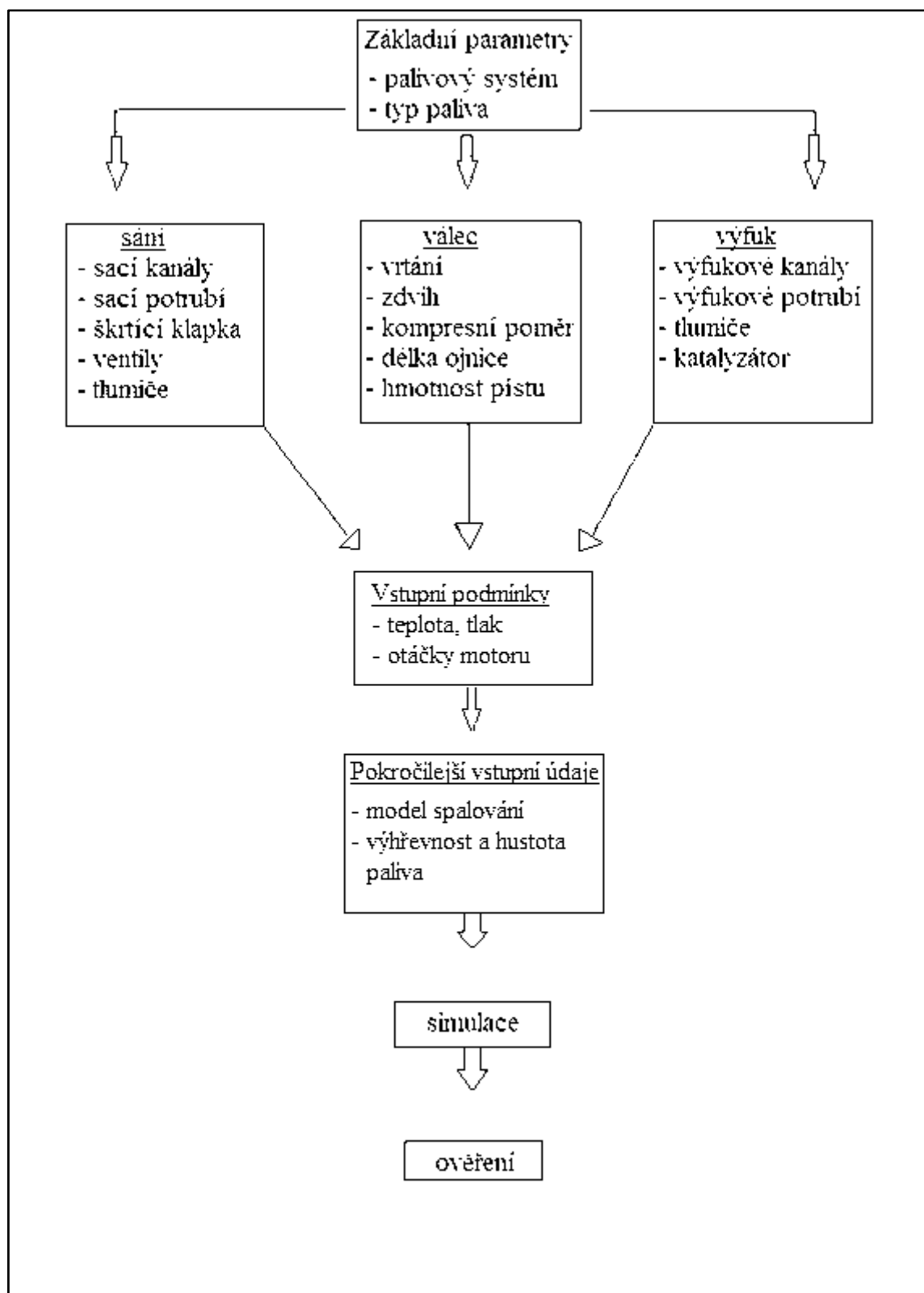
Další informace lze nalézt v teoretické části nápovědy v programu Lotus Engine Simulation. [3]

### 3.2 Metodika tvorby modelu

Pomocí programu Lotus Engine Simulation můžeme vypočítat parametry motoru, jakými jsou výkon, spotřeba spalovacích motorů, ale také je zaměřen na výpočet proudění plynů potrubím. Dále lze namodelovat různé typy motorů, dvoudobé a čtyřdobé s libovolným uspořádáním válců, k nim připojit přeplňování, nebo zadat systém vyplachování u dvoudobých motorů.

Nejprve se v programu sestavuje model z prvků, které najdeme v levé části, několik záložek rozčleněných do skupin. U každé součásti můžeme zadat vlastní hodnoty, nebo nechat hodnoty, které jsou již přednastavené. Potom volíme podmínky testu, například otáčky motoru. Poté proběhne výpočet pro jednorozměrné proudění.

V programu je možné výsledky načíst, jako jsou například průběhy výkonu a točivého momentu, tlaků, teplot apod. Na obr. 3-6 je zobrazen diagram nastavení modelu.



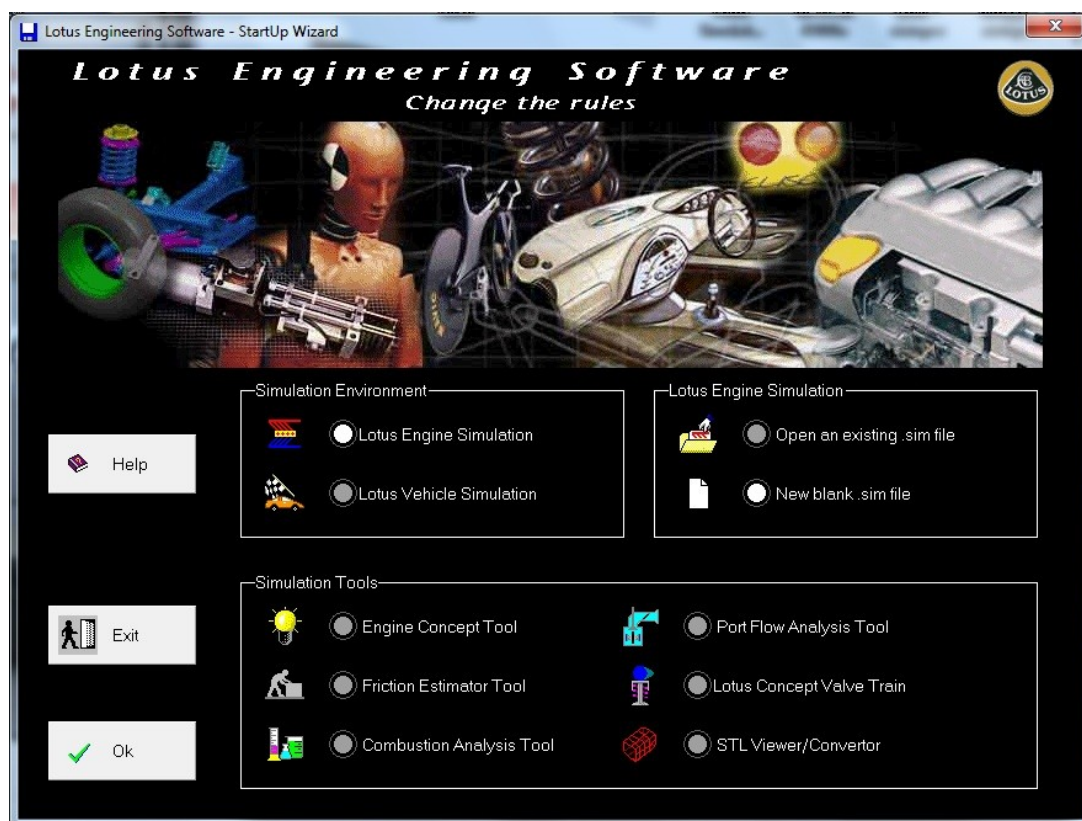
Obr. 3-6: Diagram nastavení modelu [autor]

## 4 Popis a tvorba výpočtového modelu PSM

Následující kapitola je rozdělena do dvou částí, v první popisují pracovní plochu, jednotlivé prvky, ze kterých se sestavuje výsledný model a jejich nastavení, ve druhé části potom samotný postup krok po kroku až k výslednému modelu motoru. K tvorbě modelu budu využívat program Lotus Engine Simulation (dále jen LES).

### 4.1 Popis jednotlivých prvků a jejich nastavení

Po spuštění programu LES se zobrazí průvodce (Obr. 4-1) ve kterém si lze otevřít již existující soubor, nebo namodelovat nový, obě tyto položky jsou v pravé části v kolonce LES. Při volbě nového souboru lze zvolit simulaci motoru (Engine) nebo vozidla (Vehicle), a to v rámečku Simulation Environment. Ve spodní části se nachází simulační nástroje.

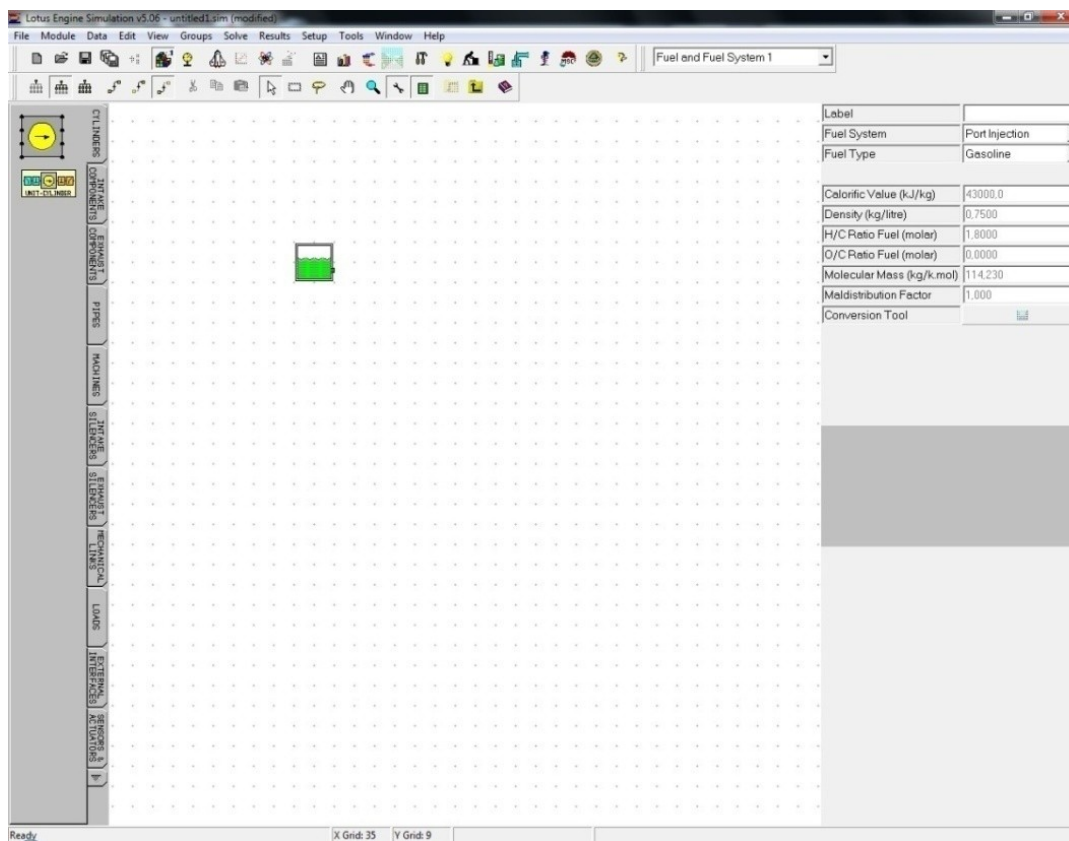


Obr. 4-1: Průvodce [autor]

Jako první je Engine Concept Tool, tady se nastavují rozměry potrubí, válce, tlaky a teploty v sacím a výfukovém potrubí apod. Funkce Friction Estimator Tool slouží k odhadu tření v motoru, zde se nastavuje kompresní poměr, typ ventilového rozvodu, typ a teplotu oleje a další. Pomocí Combustion Analysis Tool lze analyzovat proces spalování. Analýzu průtoku spustíme možností Port Flow Analysis Tool. Lotus

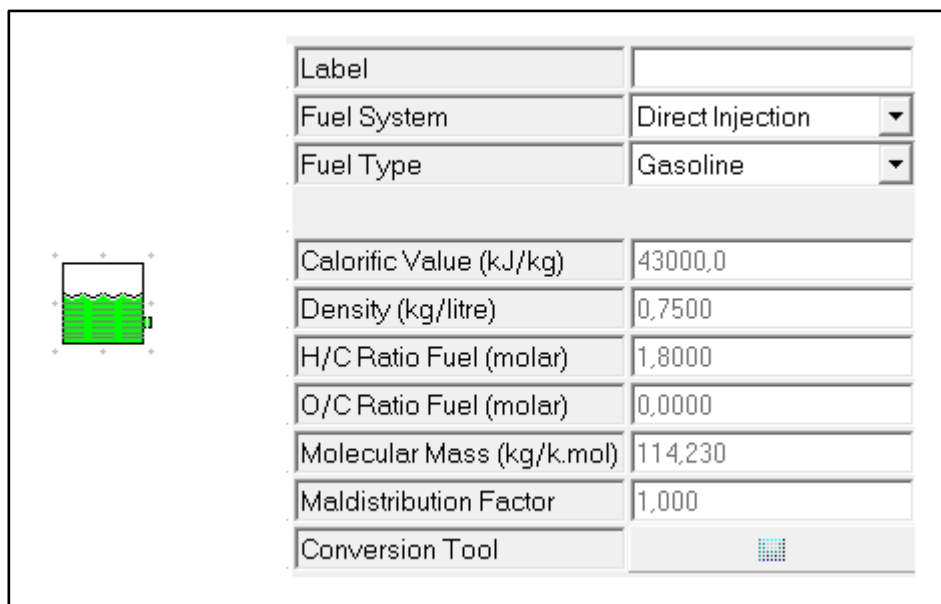
Concept Valve Train slouží k nastavení ventilového rozvodu. Poslední možností je STL Viewer/Convertor, který umožňuje číst datové soubory a prohlížet 3D modely.

V levé části nalezneme dále nápovědu (Help), opuštění průvodce (Exit) a při zvolení příslušného typu simulace potvrzení (Ok), v mém případě LES, tím se dostaneme na základní pracovní plochu, jak vidíme na obr. 4-2.



Obr. 4-2: Základní pracovní plocha [autor]

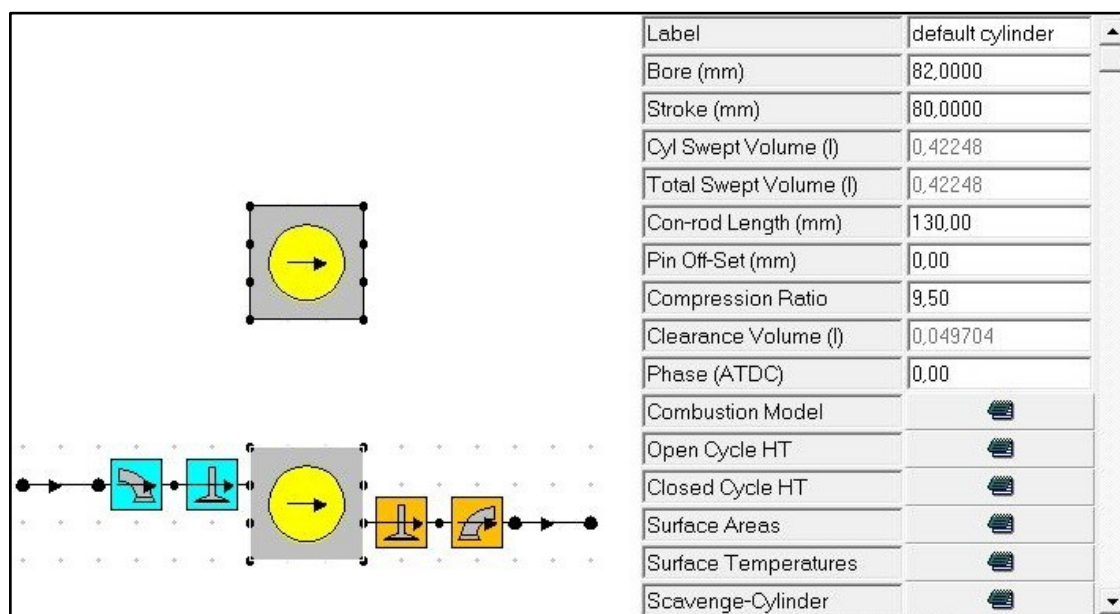
Na základní ploše se nachází ikona Fuel and Fuel System 1, která je zobrazena na obr. 4-3, a je zde trvale umístěna. Po kliknutí na tuto ikonu se v pravé části zobrazí štítek s možnostmi nastavení. Můžeme tím navolit zařízení pro přípravu směsi, na výběr je karburátor, jednobodové, přímé nebo nepřímé vstřikování. Při volbě paliva si lze nastavit benzín, naftu, metan, metanol s již předdefinovanými hodnotami, nebo nadefinovat jiné hodnoty pro jiné palivo.



Obr. 4-3: Ikona a nastavení paliva a palivového systému [autor]

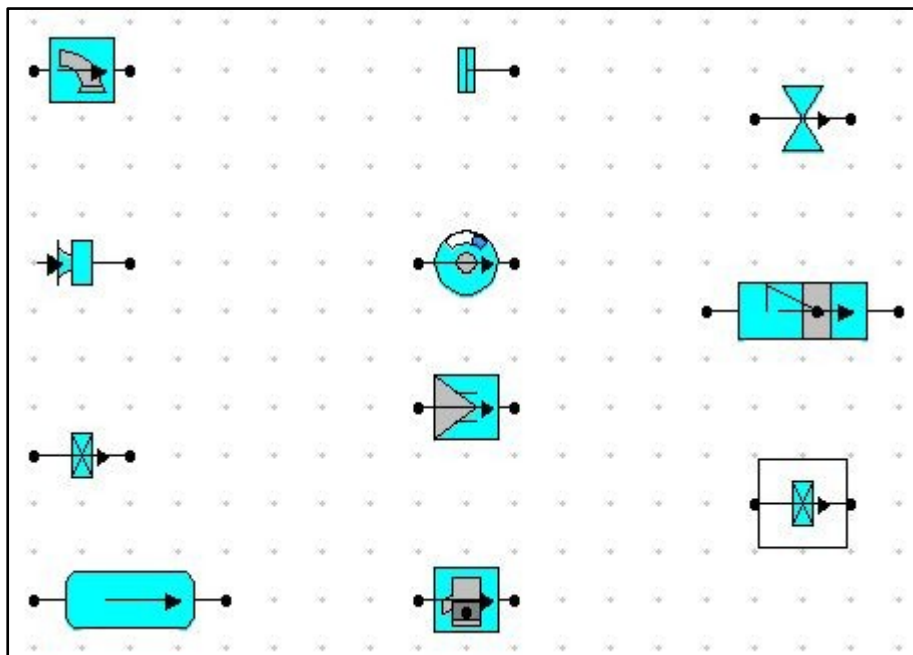
V levé části se nachází záložky pro jednotlivé skupiny používaných součástí pro tvorbu modelu. Komponenty vkládáme „chycením a přetažením“ na pracovní plochu

Jako první lze navolit válec, ikonu a nastavení vidíme na obrázku 4-4. Definovat lze základní rozměry válce, vrtání a zdvih, dále délku ojnice nebo kompresní poměr. Následně volíme model spalování, materiál pístu, teplotu apod. Pod ikonou válce se nachází ikona pro celou válcovou jednotku, jejímž přetažením na plochu získáme válec už s ventily a potrubím, jak je patrné z následujícího obrázku 4-4.



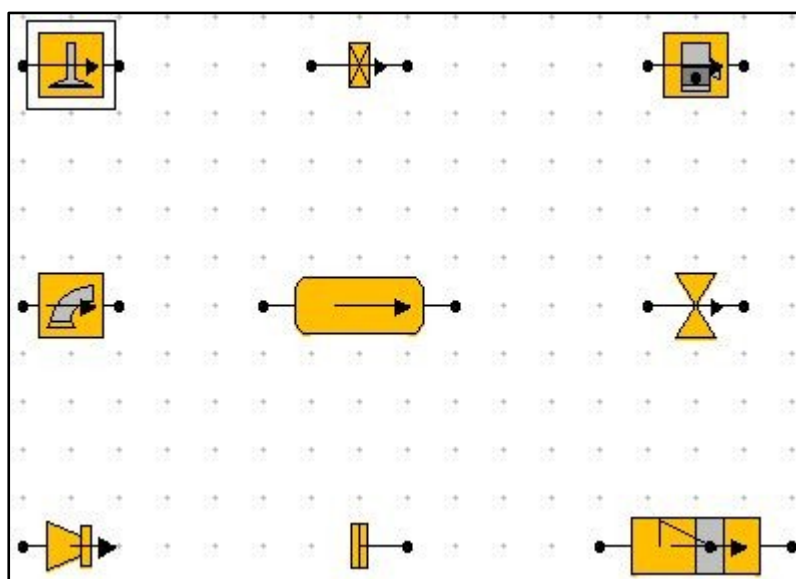
Obr. 4-4: Ikona válce, válcová jednotka a nastavení [autor]

Další záložka nabízí možnosti nastavení komponentů sání motoru. Lze zde nastavit sání od přívodu vzduchu přes potrubí až po různé typy ventilů. Ikony jednotlivých prvků jsou zobrazeny na obr. 4-5.



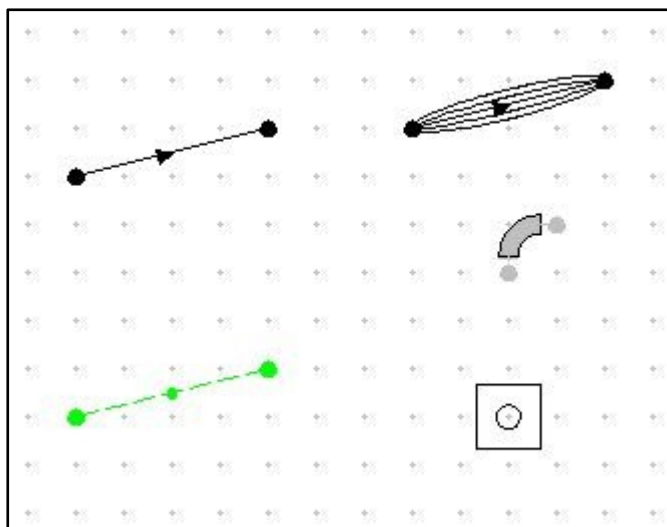
Obr. 4-5: Ikony komponentů sání seřazeny postupně [autor]

V pořadí třetí záložka slouží ke konfiguraci součásti výfuku. Podobně jako v záložce sání můžeme i v této části nastavit výfukové ventily, potrubí až po koncovou část výfuku. Ikony lze vidět na následujícím obrázku 4-6.



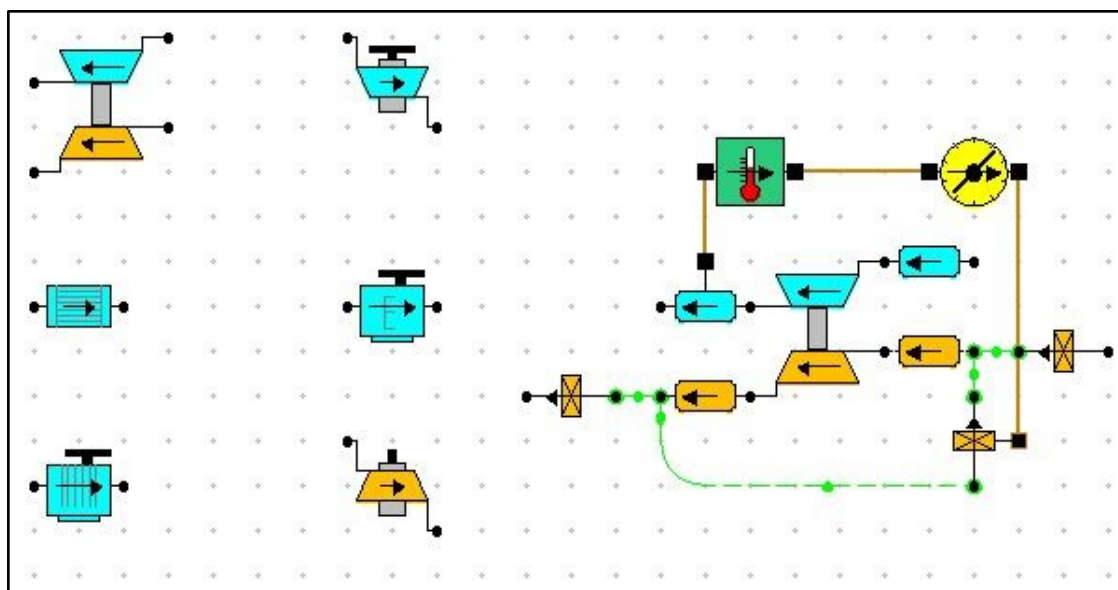
Obr. 4-6: Ikony komponentů sání seřazeny postupně [autor]

V následující záložce se nachází potrubí. Zvolit můžeme jednoduché nebo rozvětvené potrubí, kde lze definovat například délku, počáteční a konečný průměr, nebo zahnuté potrubí, kde nastavujeme úhel ohybu. Vše lze poté spojit do svodů. Ikony vidíme na následujícím obrázku 4-7.



Obr. 4-7: Ikony komponentů potrubí, seřazeny postupně[autor]

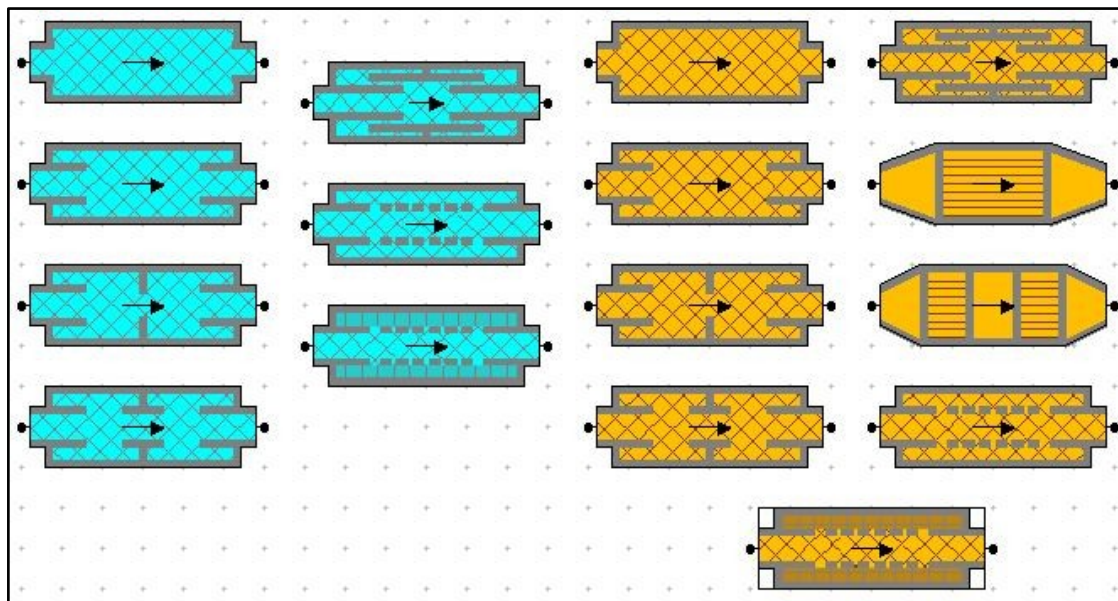
V záložce Machines najdeme součásti přepínání. Připojit lze turbodmychadlo, mechanické dmychadlo, odstředivé dmychadlo, u kterých nastavujeme například průměr turbínové a dmychadlové části, nebo chladič stlačeného vzduchu. Přetažením poslední ikony na pracovní plochu získáme sestavené turbodmychadlo s již připojeným snímačem tlaku. Ikony vidíme na následujícím obrázku 4-8.



Obr. 4-8: Ikony součástí přepínání, seřazeny postupně[autor]



V záložkách Inlet Silencers a Exhaust Silencers se nachází různé sací a výfukové tlumiče. Zvolit lze například jednoduchý průchozí, se složeným potrubím nebo jednoduchý odporový tlumič. Ikony vidíme na následujícím obrázku 4-9.



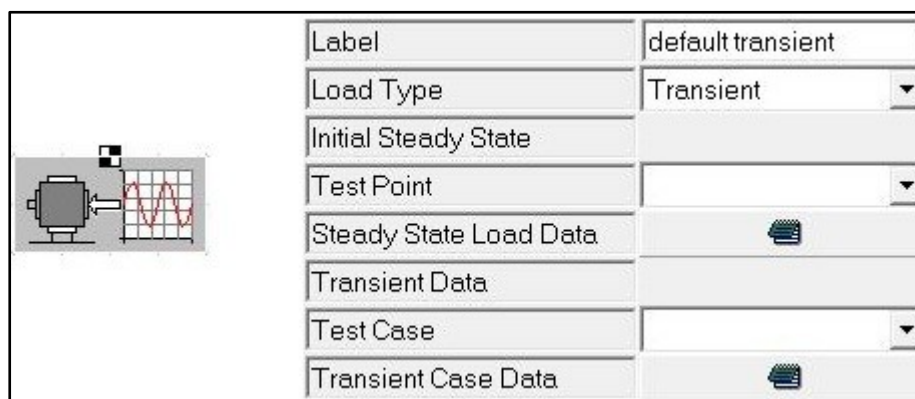
Obr. 4-9: Ikony jednotlivých typů tlumičů, sací (modré) a výfukové (oranžové) [autor]

V další záložce Mechanical links najdeme mechanické a virtuální vazby. Ikony vidíme na obrázku 4-10.



Obr. 4-10: Ikony mechanické (vlevo) a virtuální (vpravo) vazby

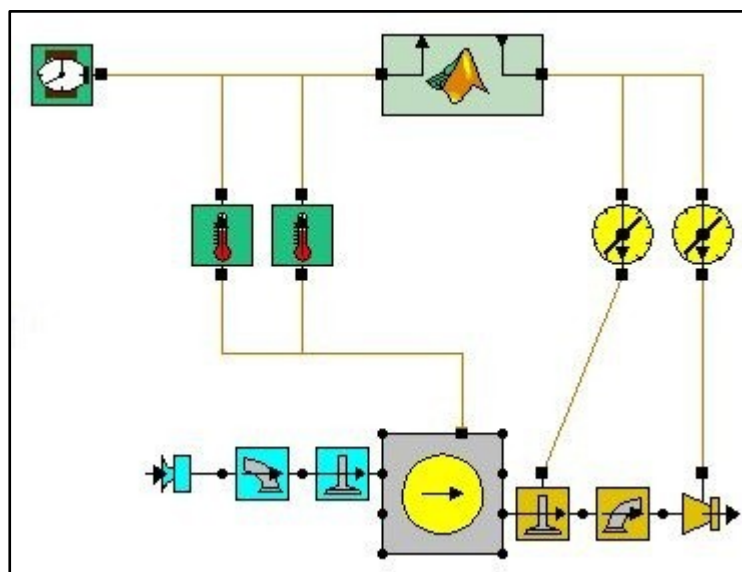
Zatěžovací diagramy jsou obsahem další záložky. Umožňuje zobrazení v přechodném nebo ustáleném stavu, tento stav lze změnit možností Load Type. Ikony jsou zobrazeny na obrázku 4-11.



Obr. 4-11: Ikona a nastavení [autor]

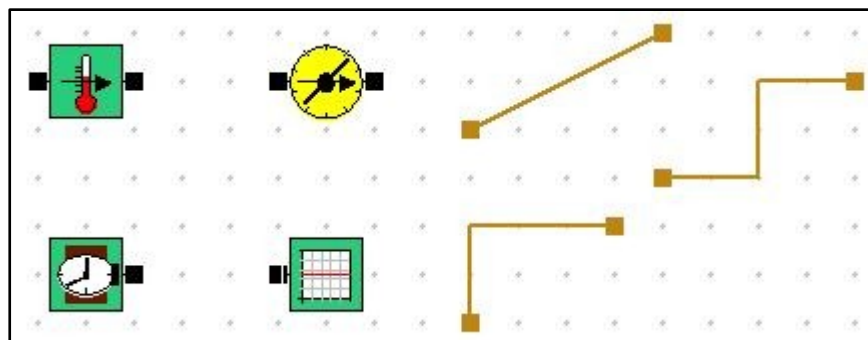


External interfaces neboli vnější prostředí lze připojit k senzorům a akčním členům, jak je patrné z následujícího obrázku 4-12.



Obr. 4-12: Vnější prostředí []

Předposlední záložku tvoří snímače a akční členy. Lze je připojit k jednotlivým součástem nebo k vytvořené skupině součástí. Ikony vidíme na obrázku 4-12.



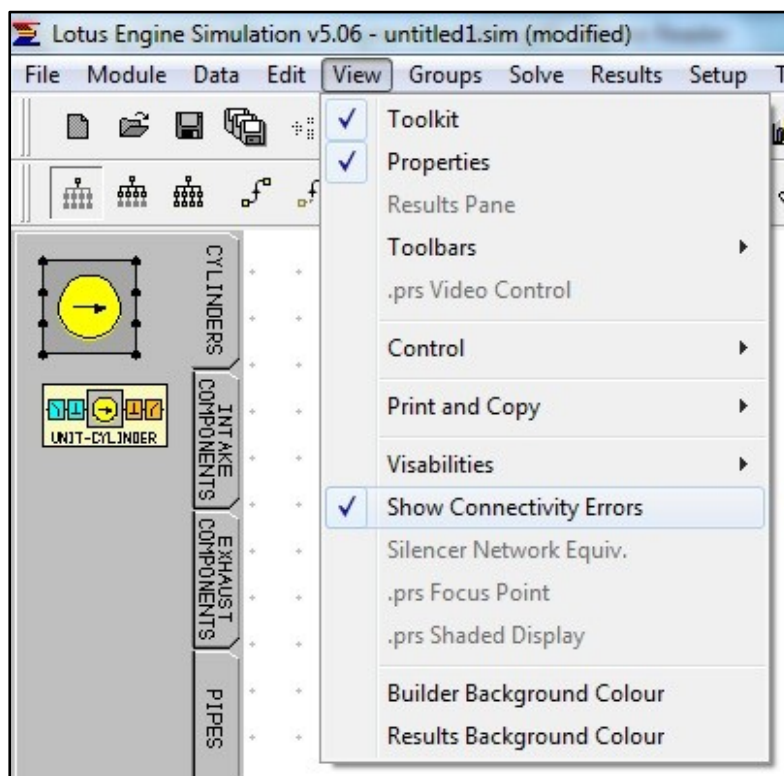
Obr. 4-12: Snímače a akční členy, seřazeny postupně [autor]

Poslední záložkou jsou Default Groups, která je po instalaci prázdná. Uloženy jsou v adresáři s názvem „Default\_groups“, který se nachází v adresáři instalace LES a mají přednastavené údaje a lze je použít pro modelování určitého modelu.

## 4.2 Tvorba výpočtového modelu

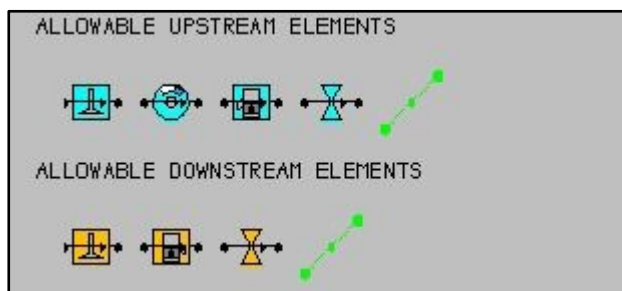
V této části se budu zabývat popisem tvorby výpočtového modelu. Krok po kroku budu popisovat, jakým způsobem se model vytváří, jak se definují jeho parametry a spouští výpočet s následným vyhodnocením výsledků. Model budu tvořit s využitím programu Lotus Engine Simulation (dále jen LES) a anglického tutorialu, ze kterého budu čerpat údaje, popřípadě s využitím výchozího nastavení programu.

Při spuštění LES se nejprve ujistíme, že máme aktivní Show Connectivity Errors, jak je patrné z obrázku 4-13., tato funkce zajistí, že při nedostatečném propojení zůstane součást červená.



Obr. 4-13: Funkce chybného připojení [autor]

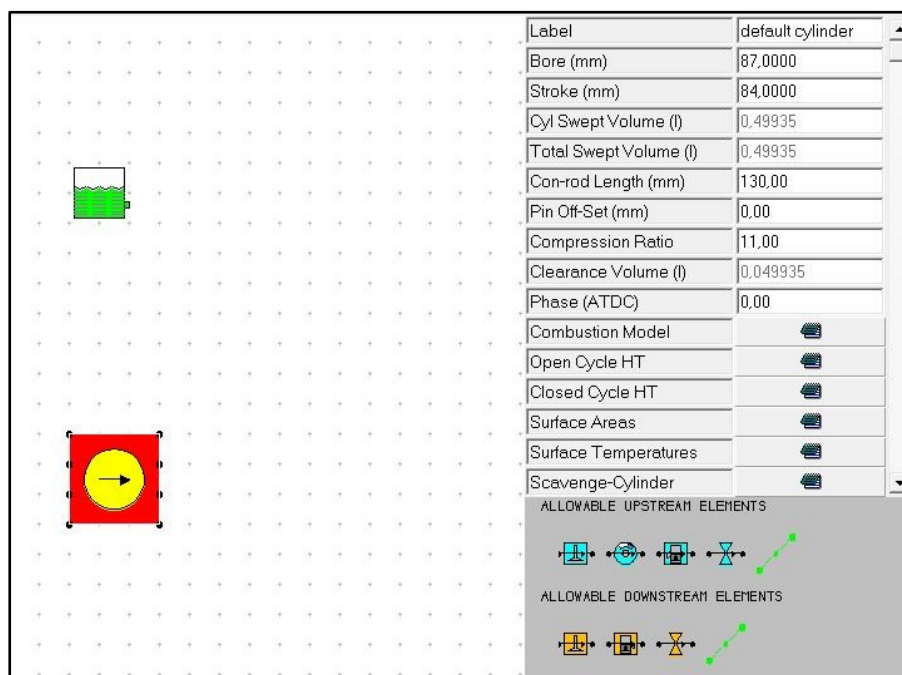
Prvky, které lze poté připojit k označené součásti, se zobrazí vpravo pod štítkem nastavení, které vidíme na obrázku 4-14. „UPSTREAM“ jsou součásti, které lze připojit proti proudění, „DOWNSTREAM“ ve směru proudění.



Obr. 4-14: Přípustné prvky k připojení [autor]

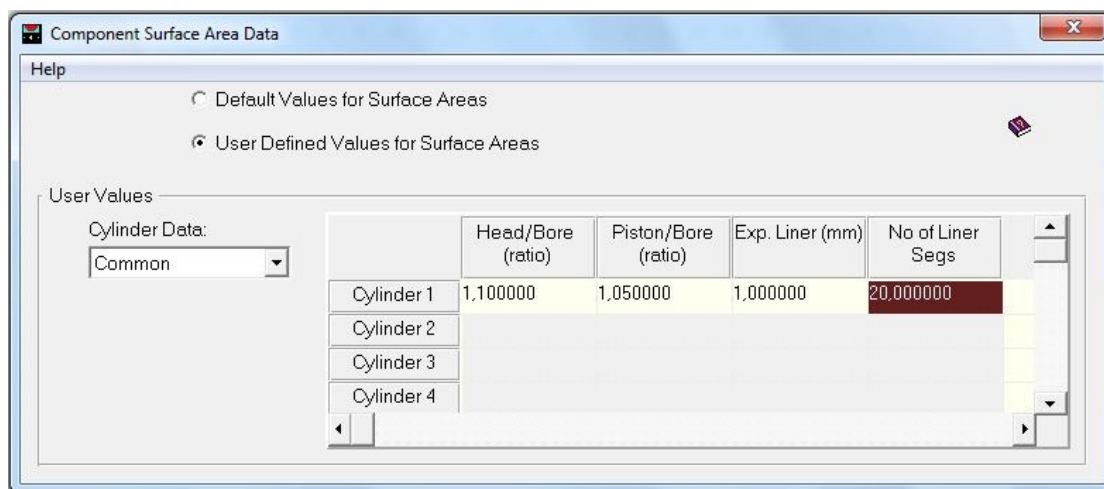
## Válec

V levé části obrazovky, v záložce Cylinders, se nachází válcová jednotka. Přetažením kdekoliv na pracovní plochu bude mít válec červenou barvu, to značí, že není dostatečně propojený s ostatními součástmi modelu. Vrtání (Bore) změníme na 87 mm, zdvih (stroke) na 84 mm a kompresní poměr (Compression Ratio) na 11, ostatní parametry necháme původní, jak vidíme na obrázku 4-15.



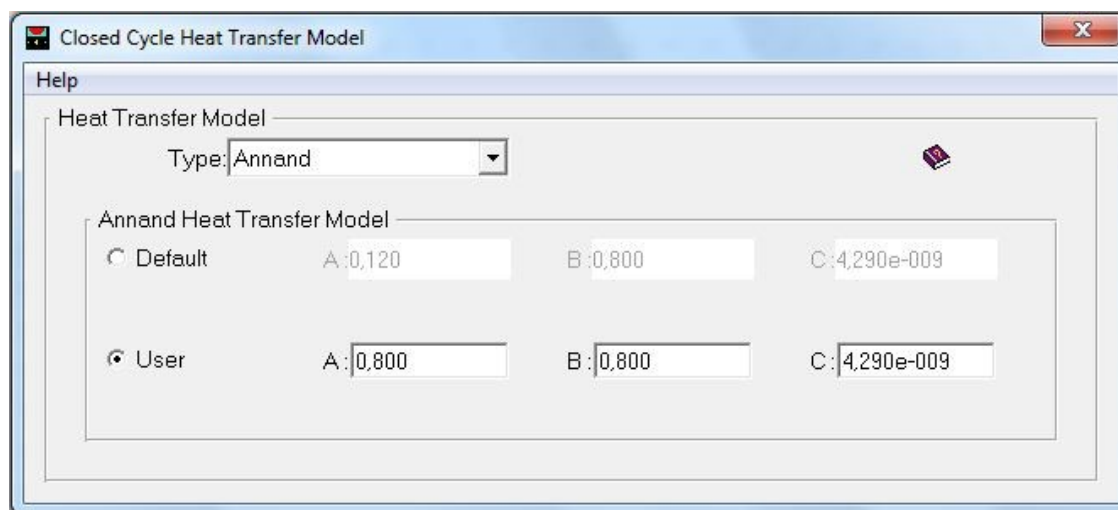
Obr. 4-15: Válec na pracovní ploše a nastavení [autor]

Poté zvolíme v pravé části možnost povrchové plochy (Surface Areas) a poměr hlavy válců/vrtání (Head/Bore) změníme na 1,1. Poměr píst/vrtání (Piston/Bore) přepíšeme na 1,05 a délku nad pístem v horní úvrati na 1 mm (Exp. Liner). Další možnosti necháme v původním stavu, jak je zobrazeno na obrázku 4-16. Poté okno zavřeme.



Obr. 4-16: Povrchové plochy [autor]

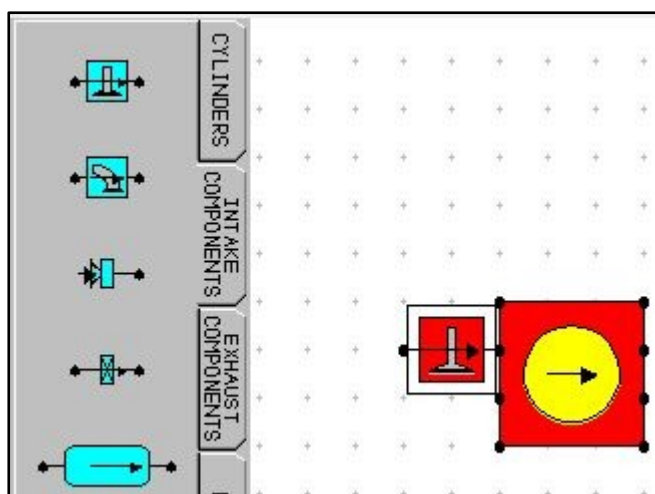
Nyní zvolíme model přestupu tepla, na výběr jsou 3, výchozí Annandův, Woschniho a Eichelbergův model. Ponecháme výchozí Annandův, vpravo klikneme na uzavřený cyklus (Closed Cycle HT) a změníme pouze koeficienty  $A=0,2$ ;  $B=0,8$ ;  $C=4,290\text{e-}009$ . Hodnoty koeficientů nalezneme v teoretické části nápovědy LES. Na obrázku 4-17 je zobrazeno okno uzavřeného cyklu.



Obr. 4-17: Uzavřený cyklus, Annandův model přestupu tepla [autor]

### Ventily

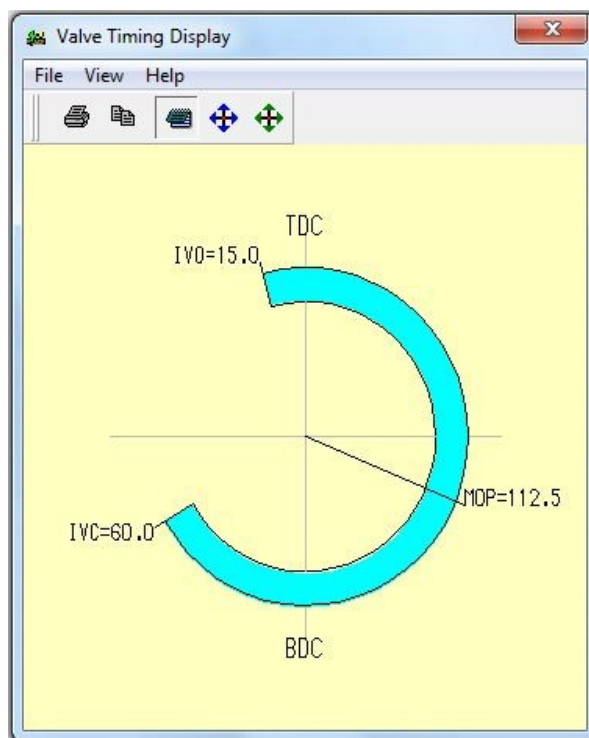
Sací ventily najdeme v záložce Intake Components. Ventil přidáme na pracovní plochu k válci podle obrázku 4-18.



Obr. 4-18: Sací ventil [autor]

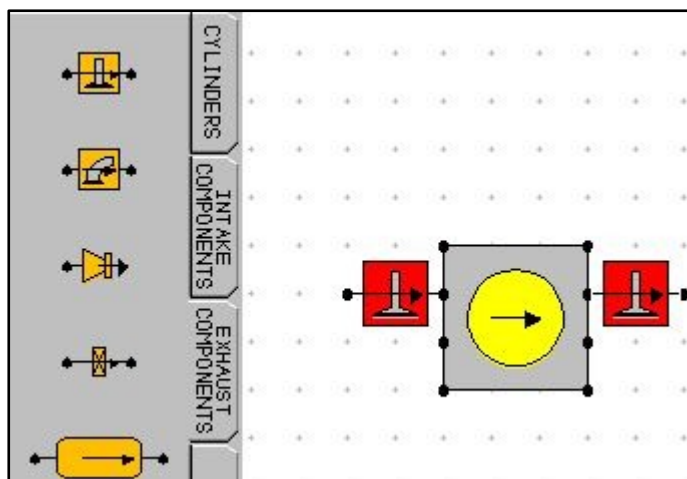
Důležité je nastavení časování ventilů. Časování lze provést více způsoby, po kliknutí na ventil se vpravo objeví štítek s nastavením. Prvním způsobem je změnit hodnoty Valve Open a Valve Close, obojí se zadává ve stupních, nebo kliknout na Valve

Timing Display a nastavit kliknutím na IVO (otevření sacího ventilu) hodnotu otevření sacího ventilu na  $15^\circ$  před HÚ (TDC) a na IVC (zavření sacího ventilu) hodnotu zavření sacího ventilu na  $60^\circ$  za DÚ (BDC). 2. způsob vidíme na obrázku 4-19.



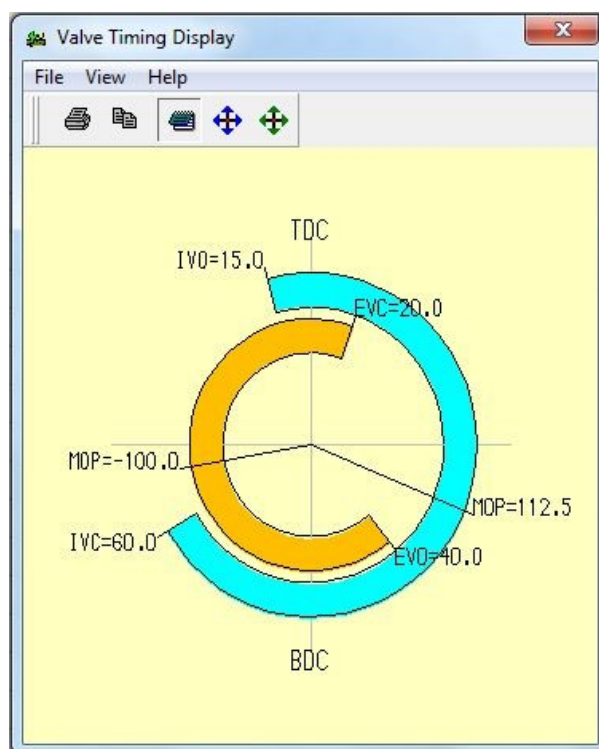
Obr. 4-19: Časování sacích ventilů [autor]

Obdobně postupujeme u výfukového ventilu. Výfukové ventily najdeme v záložce Exhaust Components. Přidáním na pracovní plochu k válcové jednotce nám válec zbarví do šeda, jak vidíme na obrázku 4-20, to znamená, že je plně propojen elementy v rámci modelu.



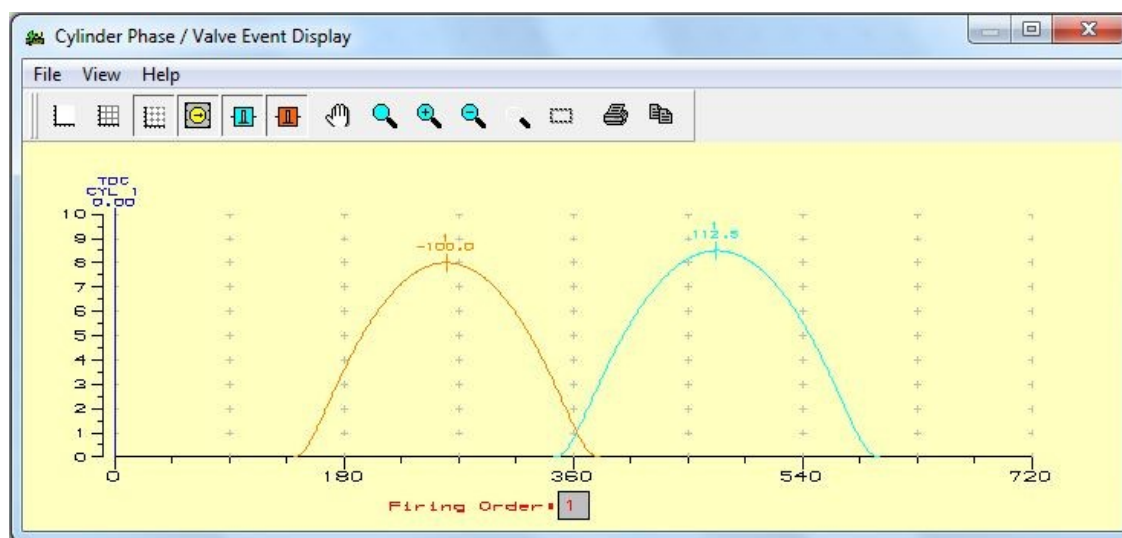
Obr. 4-20: Výfukový ventil [autor]

Časování výfukových ventilů provedeme totožně jako u sacích, hodnotu EVO (otevření výfukového ventilu) nastavíme na 40° před DÚ a EVC (zavření výfukových ventilů) na 20° za HÚ. Na obrázku 4-21 vidíme údaj MOP jak pro sací, tak pro výfukové ventily, tato hodnota udává, kdy je otevřen ventil na maximum zdvihu.



Obr. 4-21: Časování sacích a výfukových ventilů [autor]

Na obrázku 4-22 je zobrazen profil zdvihu ventilů. Hodnota maximálního zdvihu je defaultně nastavena u sacích ventilů na 8,5 mm a u výfukových na 8 mm.

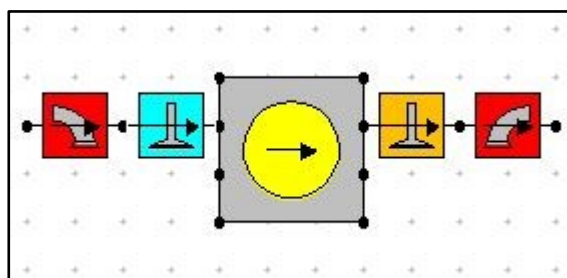


Obr. 4-22: Profil zdvihu ventilů [autor]



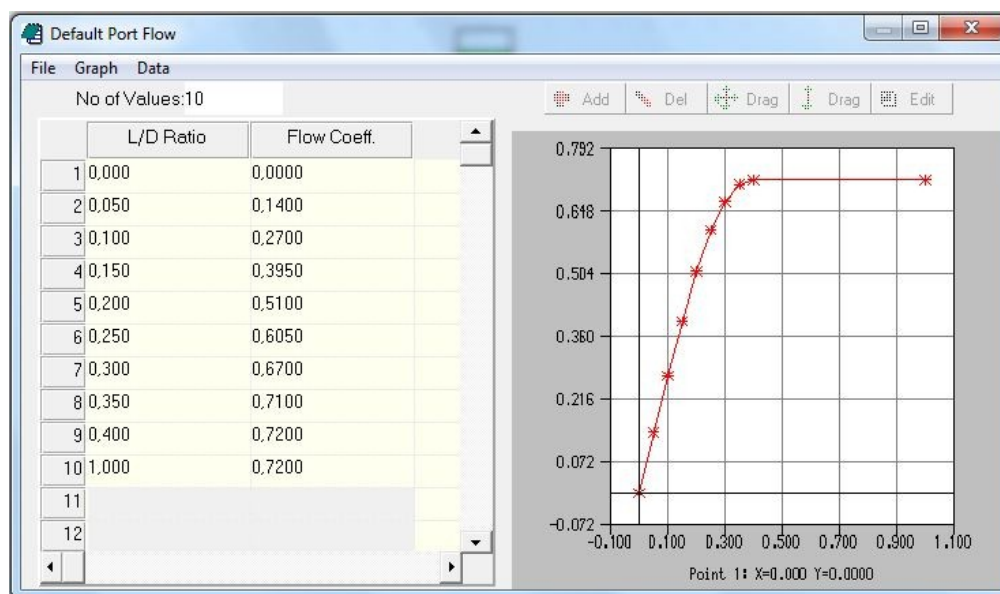
### Sedlo ventilů

Tyto součásti se nacházejí, stejně jako ventily, v záložkách Intake Components (sací) a Exhaust Components (výfukové). Připojíme je podle obrázku 4-23 k ventilům. Při kliknutí na sání se vpravo zobrazí štítek s nastavením, počet ventilů (No of Valves) je 2, tudíž není nutné modelovat jednotlivé sedla vedoucí ke každému ventilu. Simulace bude považovat toto sání jako ekvivalentní průměru součtu dvou kanálů. Průměr sedla ventilu (Valve Throat Dia) zadáme 28 mm.



Obr. 4-23: Připojené sedlo ventilů [autor]

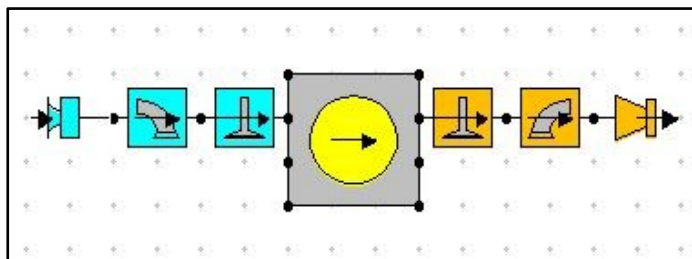
Kliknutím na tlačítko Port Data ve štítku nastavení, se zobrazí tabulka průtokových koeficientů, poměr zdvih/průměr ventilů, a graf (obr. 4-24)



Obr. 4-24: Data průtoku [autor]

### Vstupní a výstupní okrajové podmínky

Tyto elementy připojíme k sedlu ventilu i k výfuku, jak je znázorněno na obrázku 4-25. Okrajové podmínky budou definovány níže při testu.



Obr. 4-25: Kompletní model [autor]

Tímto je model kompletní a zbývá jen nastavit palivový systém a palivo. Výchozí je systém jednobodového vstříku a benzín. Nastavení je zobrazeno na obrázku 4-26.

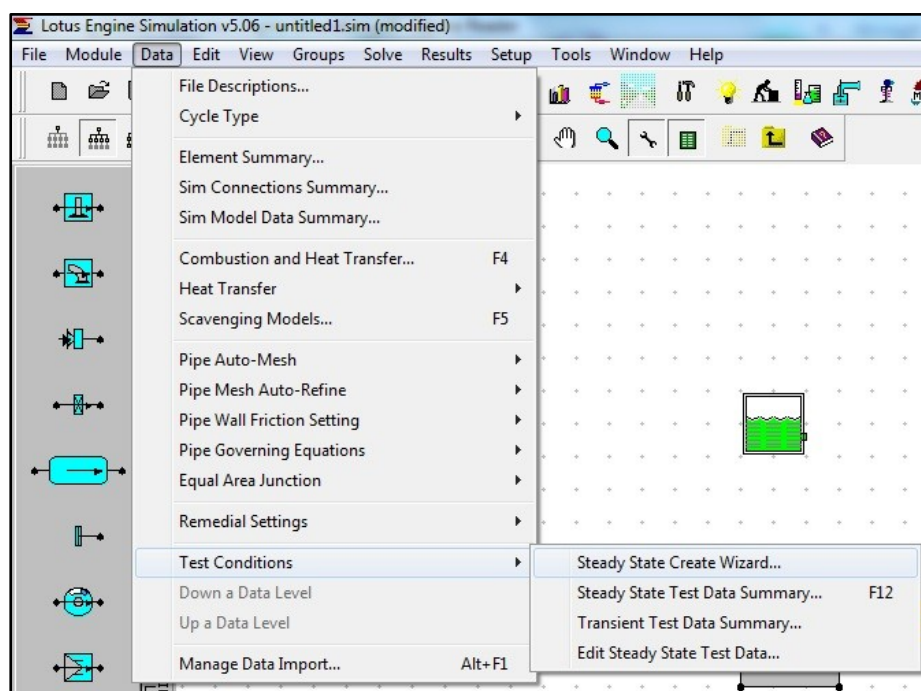
Label	
Fuel System	Port Injection ▼
Fuel Type	Gasoline ▼
Calorific Value (kJ/kg)	43000,0
Density (kg/litre)	0,7500
H/C Ratio Fuel (molar)	1,8000
O/C Ratio Fuel (molar)	0,0000
Molecular Mass (kg/k.mol)	114,230
Maldistribution Factor	1,000
Conversion Tool	

Obr. 4-26: Palivový systém a palivo [autor]



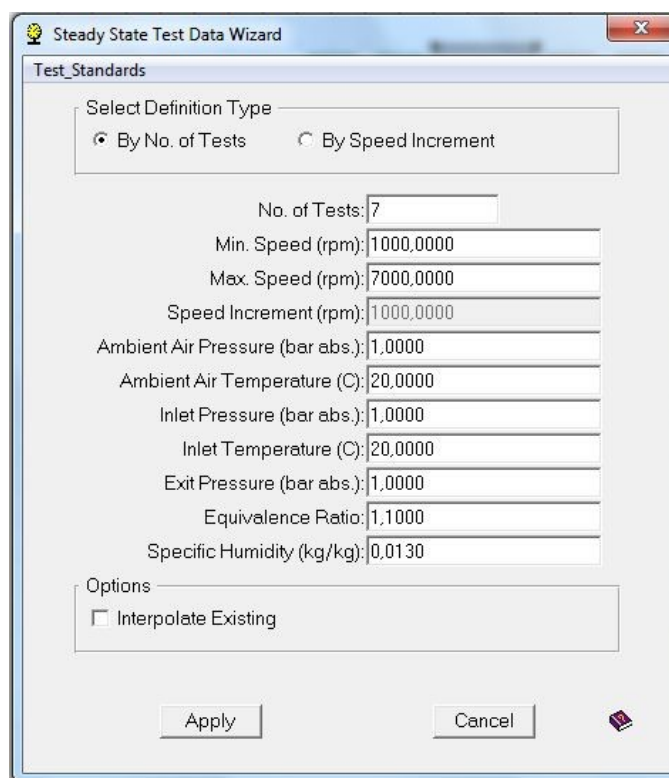
## Test

Podle obrázku 4-27 nejprve spustíme průvodce.



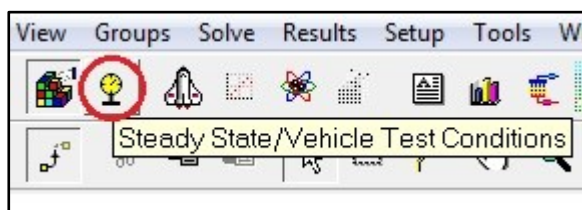
Obr. 4-27: Spuštění průvodce [autor]

Po zobrazení průvodce zadáme počet testů (No. of Tests) 7, maximální otáčky (Max. Speed) 7000  $\text{min}^{-1}$ , konečný tlak (Exit Pressure) 1 bar, ekvivalentní poměr 1,1. Hodnoty vidíme na obrázku 4-28. Poté klikneme na Apply.



Obr. 4-28: Počáteční podmínky testování [autor]

Test spustíme tlačítkem zobrazeným na obrázku 4-29.



Obr. 4-29: Ikona pro spuštění testu [autor]

Průvodce vygeneroval a definoval některé údaje, které nebyly vybrány, například parametry uvolňování tepla. Vztah pro výpočet tření v motoru byl zvolen dříve. Výslednou tabulku vidíme na obrázku 4-30. Okno poté zavřeme.

Test Point	Speed (rpm)	Solve	Label	Case Type	Load Finder Units	Load Finder Value	Control Group	Control Vari
1	1000	On	Load Case 1 - (	Builder Def.				
2	2000	On	Load Case 2 - (	Builder Def.				
3	3000	On	Load Case 3 - (	Builder Def.				
4	4000	On	Load Case 4 - (	Builder Def.				
5	5000	On	Load Case 5 - (	Builder Def.				
6	6000	On	Load Case 6 - (	Builder Def.				
7	7000	On	Load Case 7 - (	Builder Def.				

Obr. 4-30: Shrnutí testu [autor]

Pro uložení výsledků simulace stačí kliknout na možnost Data/File Descriptions, tím se zobrazí následující okno (obr. 4-31) a pojmenovat libovolně tento test.

File Text Descriptors

Main Title  
Jednoválcový motor

Sub Title  
model

Test No. (must be a SINGLE word)  
tutorial\_1

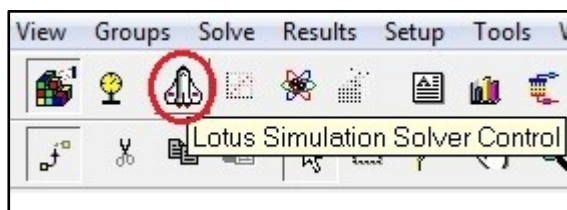
OK Cancel

Obr. 4-31: Pojmenování testu [autor]

Kliknutí na ikonu v levé horní části (Save Data to File) uloží test do určené složky.

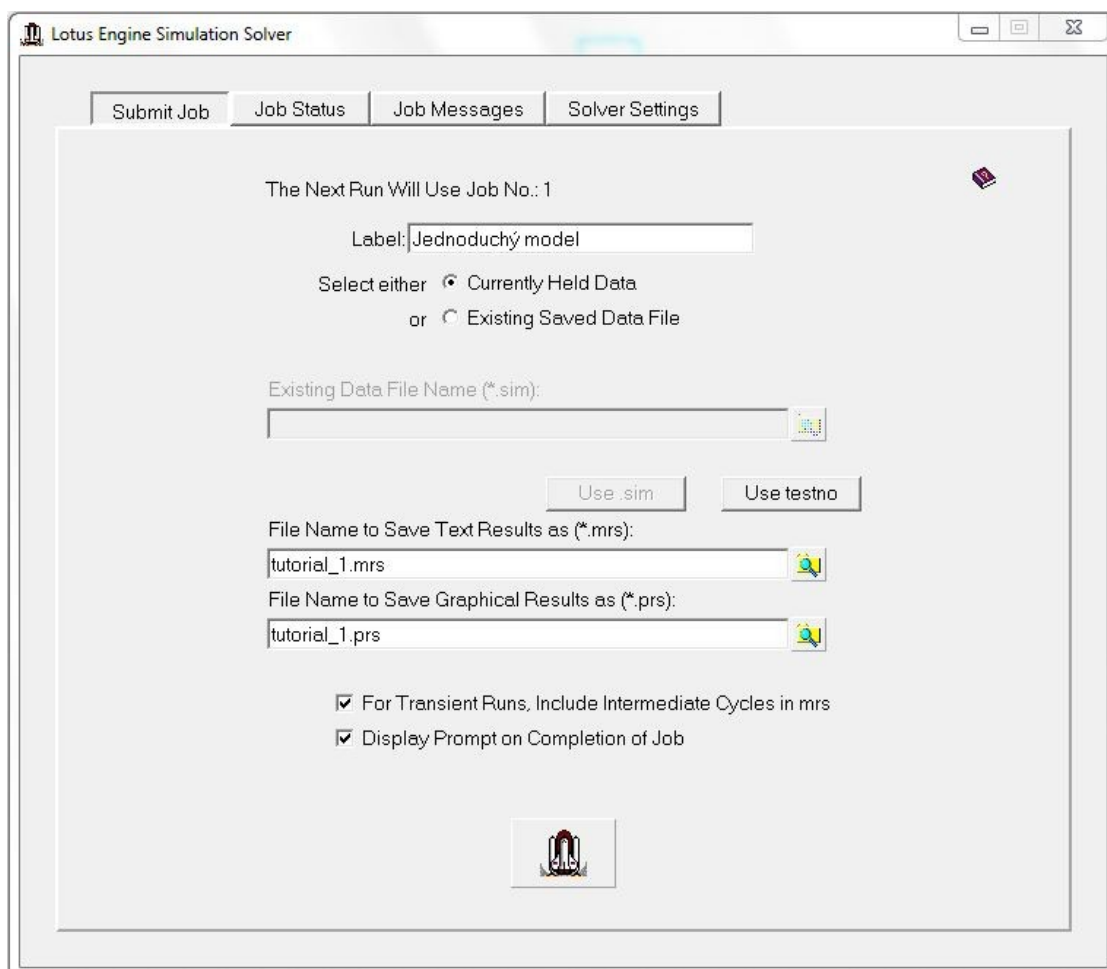
## Spouštění řešiče

Spuštění provedeme ikonou zobrazenou níže na obrázku 4-32.



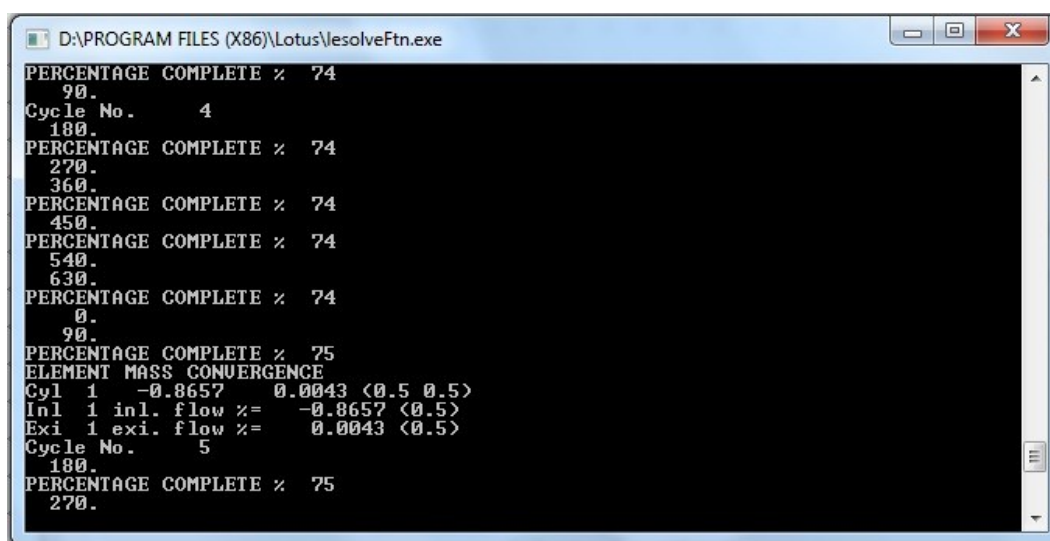
Obr. 4-32: Ikona řešiče [autor]

Kliknutí na ikonu vyvolá okno, které vidíme na obrázku 4-33. Do kolonky Label napíšeme libovolný název, zvolíme Currently Held Data, to znamená, že řešič bude pracovat s nastavenými daty. Poté klikneme na tlačítko Use testno, program nám tak vypíše následující kolonky automaticky. Vše ostatní necháme defaultně nastavené. Potvrdíme kliknutím na ikonu řešiče.



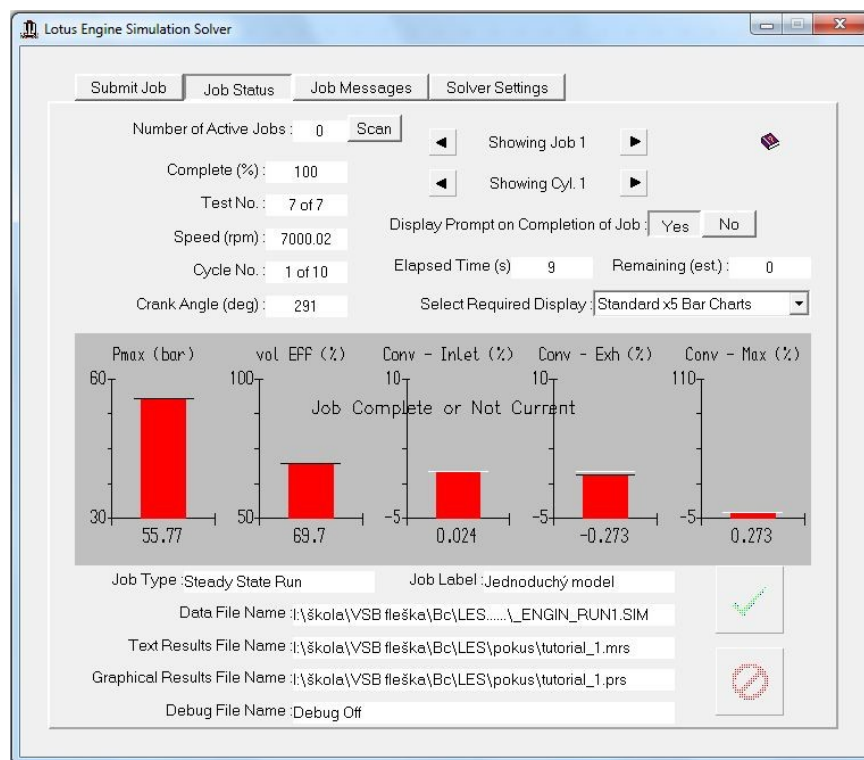
Obr. 4-33: Nastavení řešiče [autor]

Program zahájí simulaci, zobrazené okno nezavírejte, protože by se zastavila simulace. Okno vidíme na následujícím obrázku 4-34.



Obr. 4-34: Průběh simulace [autor]

Průběh úlohy zobrazíme spuštěním řešiče a záložky Job Status (obr. 4-35). V první kolonce je zobrazen počet aktivních úloh, dále úplnost testu, číslo testu, v našem případě 7 testů od 1000 do 7000 min<sup>-1</sup>, počet cyklů a úhel natočení klikové hřídele. Zobrazen je také uplynulý čas a odhad zbývajících času. Červené sloupce zobrazují například maximální tlak ve válci nebo objemovou účinnost, tyto hodnoty jsou aktualizovány při každém cyklu.

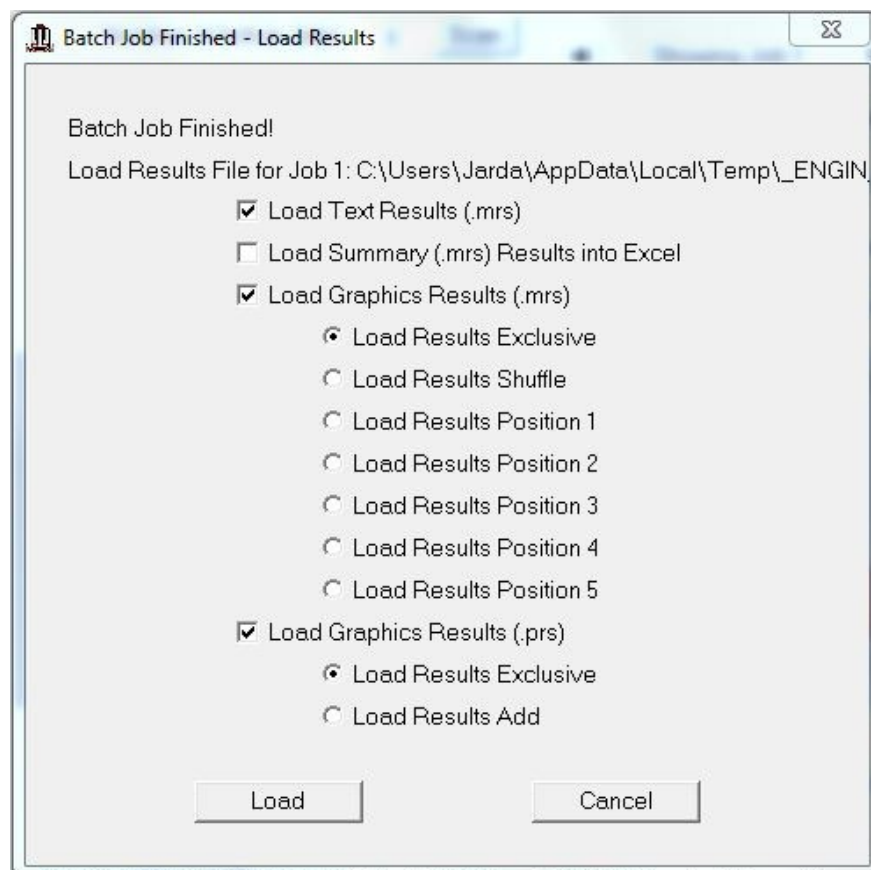


Obr. 4-35: Kompletní úloha [autor]

## 5 Zhodnocení a doporučení

### 5.1 Vyhodnocení výsledků

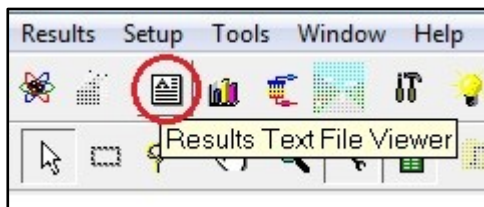
Vyhodnocení je prováděno několika způsoby. Prvním z nich je zobrazení textové, dále si výsledky můžeme zobrazit v programu Excel, nebo využít grafické zobrazení v programu LES. Na konci simulace se objeví okno (obr. 4-36), které umožňuje zobrazit výsledky.



Obr. 4-36: Možnosti načtení výsledků [autor]

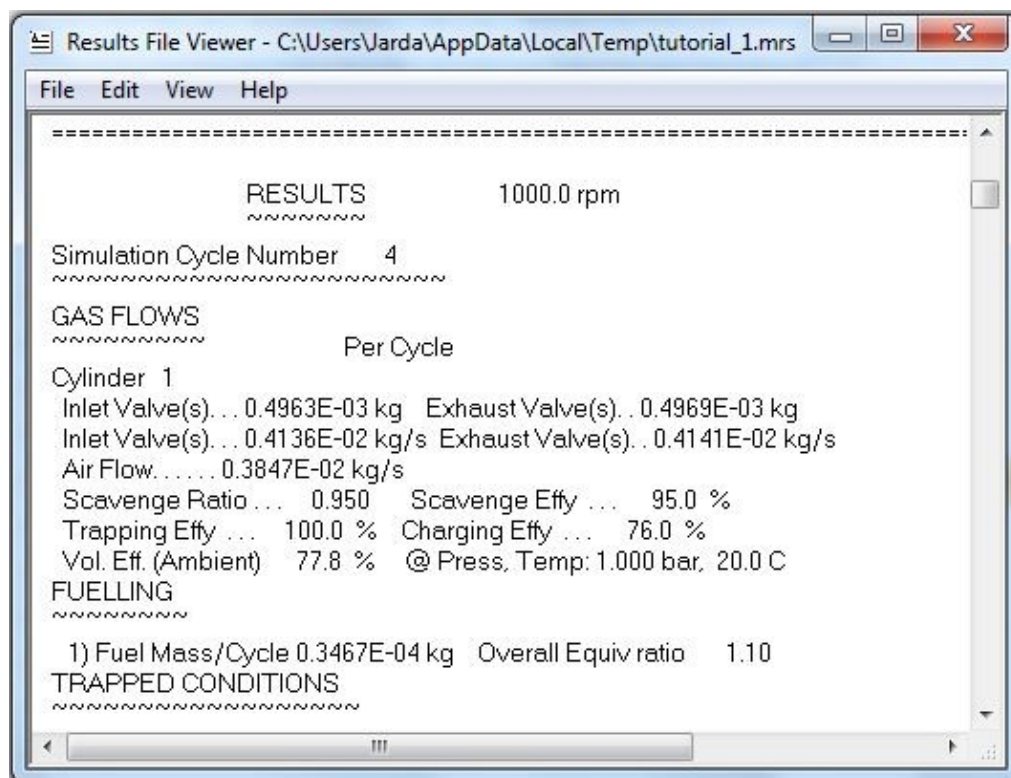
### 5.1.1 Textové znázornění

Textový soubor obsahuje všechny výsledky ze simulace motoru, jako jsou točivý moment, výkon, střední efektivní tlak apod. Tento soubor lze načíst po kliknutí na následující ikonu (obr. 4-37).



Obr. 4-37: Ikona pro textové zobrazení výsledků [autor]

Textové výsledky jsou zobrazeny na obr. 4-38. Nalezneme zde výsledky pro každý zkušební bod, neboli provozní stav, podrobné informace o hmotnostním průtoku přes ventily, výkonu, spotřebě paliva apod. Tento dokument lze číst například i v programu WordPad.

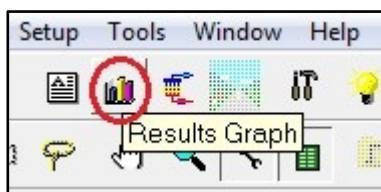


Obr. 4-38: Výsledky v textové podobě [autor]



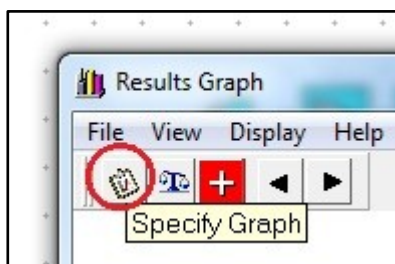
### 5.1.2 Grafické znázornění

Grafické zobrazení provedeme kliknutím na následující ikonu (obr. 4-39)



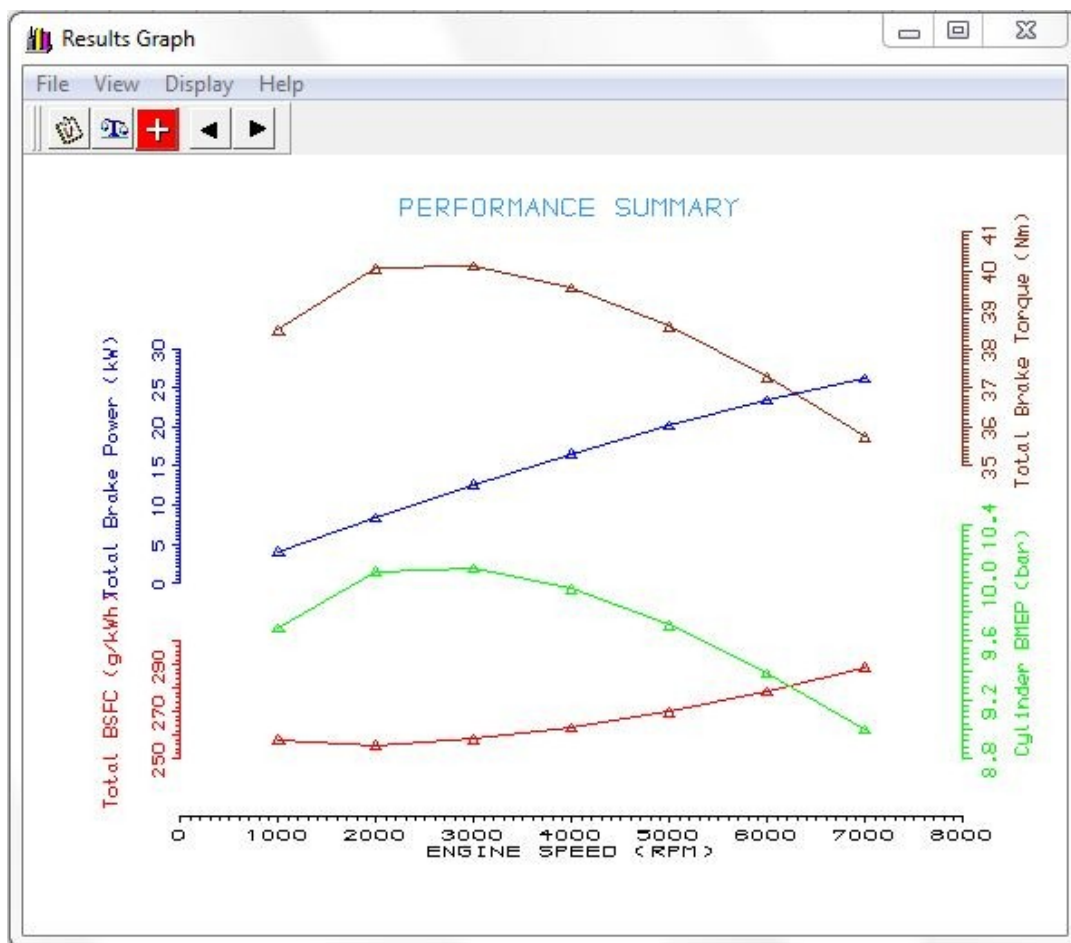
Obr. 4-39: Ikona pro grafické zobrazení výsledků [autor]

Graficky si lze vykreslit velké množství dat, od výkonu motoru, točivého momentu, středního efektivního tlaku až po teplotu válce nebo pístu, ale také stechiometrický poměr, které se zobrazí na svislé ose. Na vodorovné ose jsou zobrazeny otáčky klikové hřídele za minutu. Vykreslit data můžeme několika způsoby, stisknutím ikony zobrazené na obrázku 4-40, a to buď jednotlivě (Single - obr. 4-41), do jednoho grafu (Overlay), nebo individuálně (Individual).



Obr. 4-40: Ikona zobrazení grafů [autor]

Černými šipkami lze listovat mezi grafy. K dispozici je výkonový souhrn (na obrázku 4-41), souhrn průtoku vzduchu jak sáním, tak výfukem, nebo proces spalování.



Obr. 4-41: Zobrazení graficky [autor]

## 5.2 Doporučení

Tato práce je vhodná pro základní orientaci v programu Lotus Engine Simulation, proto bych ji doporučil jako pomůcku při výuce, jako učební text, ale i těm, kteří se chtějí dozvědět něco o spalovacích motorech a základech modelování motorů, konkrétně v programu Lotus Engine Simulation.



## **6 Závěr**

V bakalářské práci byly popsány základy spalovacích motorů a modelování v simulačním programu, v mém případě Lotus Engine Simulation (dále jen LES). Na začátku práce je popsána historie spalovacího motoru a princip činnosti. V další části byly přiblíženy funkce simulačních programů, tyto programy se v současné době staly nedílnou součástí vývoje spalovacích motorů. V této práci jsem popsal modelování motoru v programu LES a vytvořil postup tvorby modelu. Součástí bakalářské práce je tutoriál, který zobrazuje postup při tvorbě jednoduchého modelu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] RICHTÁŘ, Michal, NEUGEBAUER, Josef. *Vozidlové motory*. Ostrava
- [2] Autoznanosti.cz. Dostupné z: <http://www.autoznanosti.cz/index.php/motor/36-ventilove-rozvody-zakladni-rozdeleni.html>
- [3] Lotus Engineering Software, Group Lotus Plc, Norfolk, United Kingdom.  
Dostupné z: <http://www.lotuscars.com/gb/engineering/engineering-software>
- [4] Bc. CHUCHMA, Ondřej. *Návrh a optimalizace sacího a výfukového potrubí zážehového motoru*. Brno, 2010. 37, 38 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně
- [5] Ricardo UK, Shoreham Technical Centre, Shoreham-by-Sea, West Sussex, BN43 5FG. Dostupné z: <http://www.ricardo.com/en-GB/What-we-do/Software/Products/WAVE/>
- [6] Gamma Technologies, Inc., 601 Oakmont Lane, Suite 220, Westmont, IL 60559, USA. Dostupné z: [http://www.gtisoft.com/applications/a\\_Engine\\_Performance.php](http://www.gtisoft.com/applications/a_Engine_Performance.php)